

Département de géomatique appliquée  
Faculté des lettres et sciences humaines  
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

INFORMATION CONFIDENTIELLE

# Conception d'un dispositif de caractérisation de la glace et de la neige à partir d'un radar à émission continue

---

**Patrick Pomerleau**

Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences géographique (M.Sc.),  
cheminement Télédétection

Juin 2016

© Patrick Pomerleau, 2016

## Identification du jury

### Directeur de recherche :

Dr **Alain Royer**, Professeur titulaire, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

### Membres du jury :

Dr **Alexandre Langlois**, Professeur, Département de géomatique appliquée, Faculté des lettres et sciences humaines, Université de Sherbrooke

Pr. **Michel Fily**, Professeur, Université Grenoble Alpes, Chercheur au LGGE, Délégué Scientifique HCERES, Laboratoire de Glaciologie et Géophysique de l'Environnement (UMR 5183 CNRS-UJF)



## Ce document réalisé dans le cadre d'un projet de recherche avec la compagnie Campbell Scientific Canada est confidentiel.

### Résumé

Dans le but d'augmenter la sécurité des activités hivernales sur les glaces de lacs et de rivières, ce projet de maîtrise consiste à mettre en œuvre un radar de détection de l'épaisseur de glace et à élaborer des algorithmes qui sont capables de déterminer de façon automatique la solidité de la glace à partir d'écho radar. Un radar FMCW (Frequency Modulated Continuous-Wave) a été choisi pour ses caractéristiques tel que son prix, sa précision, sa fréquence centrale et ses dimensions. Dans ce mémoire, on présente les résultats des tests effectués sur le radar lui-même, ceux en laboratoire avec des blocs de glace, ainsi que les mesures sur le terrain effectuées durant l'hiver 2015 et 2016. Grâce aux algorithmes développés, il a été possible de mesurer automatiquement l'épaisseur de la glace de plusieurs lacs, à travers la neige, avec une erreur moyenne de 2 cm. Nous croyons aussi qu'il est possible de discerner l'intersection entre la glace blanche et la glace noire sur les profils radars. La glace blanche, résultant du gel de la neige humide sur les cours d'eau est moins solide que la glace noire et influence la solidité totale de la glace.

Nous avons aussi élaboré une méthode pour évaluer l'équivalent en eau de la neige (SWE) à l'aide du même radar lors de quatre campagnes de terrain au Québec et dans le nord du Canada. Ces mesures sont basées sur l'indice de réfraction de la neige qui change selon sa densité. Si la position du radar et l'épaisseur de neige sont connues, nous pouvons déduire l'indice de réfraction et la densité moyenne de la neige et ainsi calculer le SWE. Les tests effectués durant l'hiver 2016 sur des bancs de neige entre 10 et 720 mm de SWE nous donnent une erreur moyenne de 25%, ce qui est plus élevé que le capteur à rayon Gamma CS725 de Campbell Scientific Canada, habituellement utilisé pour mesurer le SWE. Mais l'analyse des résultats montre que le manque de précision serait dû aux réflexions des couches de glace présentes dans la neige qui rendent difficile la tâche de trouver la position de référence. Nous croyons qu'il serait possible d'atteindre une précision d'environ 5% si le système radar était monté dans une installation fixe et de manière à ne pas être influencé par les couches de glace. L'avantage d'un tel système est qu'il pourrait mesurer des valeurs de SWE plus importantes que le CS725 (600 mm de SWE maximum), tout en consommant beaucoup moins d'énergie.

**This document realized in collaboration with Campbell Scientific Canada is confidential.**

## **Abstract**

In order to increase the safety of winter activities on the ice of lake and river, this thesis project aims to implement an ice thickness detection radar and develop algorithms that are able to determine automatically the strength of the ice from radar echo. A radar FMCW (Frequency Modulated Continuous-Wave) was chosen for its characteristics such as its price, accuracy, central frequency and size. In this thesis, we present the results of tests on the radar itself, those in the laboratory with ice blocks, and field measurements conducted during the winters 2015 and 2016. With our own algorithm developed for this project, it was possible to automatically measure the thickness of ice of several lake and rivers, through the snow, with an average error of 2 cm. We also believe that it is possible to discern the intersection between white ice and black ice on radar profiles. White ice resulting from freezing of wet snow on the river is less solid than black ice and influences the overall strength of the ice.

We also developed a method to assess the snow water equivalent (SWE) using the same radar during four field campaigns in Quebec and northern Canada. These measurements are based on the refractive index of the snow that is changed by its density. By measuring the radar position above the soil and the snow depth, we can deduce the refractive index and the average density of the snow, and then calculate the SWE. Tests conducted during the winter of 2016 in a range between 10 and 720 mm of SWE give us an average error of 25%, which is higher than the Gamma ray sensor CS725 made by Campbell Scientific Canada (in collaboration in this project), usually used to measure the SWE. But the analysis shows that lack of precision is due to the layers of ice reflections present in the snow that make it difficult to find the reference position. We believe it would be possible to achieve an accuracy of about 5% if the radar system was mounted in a fixed installation and so as not to be influenced by the ice layers. The advantage of such a system is that it could measure higher snow depth than the CS725 do (600 mm maximum SWE), while consuming significantly less power.

## Table des matières

1. Introduction .....	9
2. Cadre théorique .....	10
2.1. Coefficient de réflexion et de transmission.....	10
2.2. Propriété de la neige .....	11
2.3. Propriété de la glace.....	12
3. Expérimentations scientifiques antérieures.....	14
4. Radar .....	17
4.1. Propriété du radar FMCW .....	17
4.2. Radar sélectionné pour étude .....	18
4.2.1. Concept multicanal.....	18
4.2.2. Période de rampe et « padding » .....	19
4.3. Programme Python pour prise de mesures V1.0 .....	20
4.3.1. Aperçu .....	20
4.3.2. Interface usager.....	21
4.4. Carte d'interface autonome V2.0.....	22
4.4.1. Aperçu .....	22
4.4.2. Interface Radar .....	23
4.4.3. Enregistrement des données.....	23
4.4.4. Interface usager.....	23
4.4.5. Test de performance lecture radar + écriture carte SD.....	24
4.4.6. Consommation électrique .....	24
4.5. Calcul automatique de l'épaisseur de glace et de neige .....	24
4.5.1. Dans les conditions idéales.....	24
4.5.2. Limitations .....	26
4.6. Fonctionnement de l'algorithme de mesure automatique .....	27
4.6.1. Mode apprentissage.....	27
4.6.2. Mode Tracking.....	27
4.6.3. Facteur de Qualité .....	28
5. Expérimentations en laboratoire .....	29

5.1.	Analyse du radar IMST.....	29
5.1.1.	Test de linéarité.....	29
5.1.2.	Amélioration de la mesure linéaire .....	29
5.1.3.	Test de résolution.....	32
6.	Méthodologie pour la mesure d'épaisseur de glace .....	34
6.1.	Scénario A.....	34
6.2.	Scénario B.....	35
6.3.	Scénario C.....	36
6.4.	Scénario D .....	36
7.	Résultats.....	37
7.1.	Mesures sur le terrain .....	37
7.1.1.	Lac Memphrémagog.....	37
7.1.2.	Rivière Châteauguay.....	39
7.1.3.	Rivière Magog à partir du pont King, Sherbrooke .....	40
7.2.	Résultats du calcul automatique de l'épaisseur de glace.....	41
7.2.1.	Rivière Châteauguay et Acadie.....	41
7.2.2.	Lac Massawippi.....	42
7.2.3.	Lac Abitibi .....	43
7.2.4.	Lac Memphrémagog.....	44
7.2.5.	Analyse des données de la rivière Châteauguay et Acadie avec le nouvel algorithme .....	47
7.3.	Synthèse des Résultats .....	48
7.4.	Discussion sur des tests supplémentaires effectués lors des campagnes sur le terrain .....	49
7.4.1.	Glace blanche .....	49
7.4.2.	Glace humide sous neige mouillée.....	51
7.4.3.	Technique expérimentale pour éliminer l'humidité de surface .....	53
8.	Conclusion pour la mesure de l'épaisseur de glace .....	54
9.	Méthodologie pour la mesure de SWE .....	55
9.1.	Montage .....	55
9.2.	Protocole expérimental.....	56
9.3.	Sites de recherche .....	57
10.	Résultats, mesure de SWE.....	58

11.	Analyse, mesure de SWE .....	59
11.1.	Précision du radar. ....	59
11.2.	Fusion de pic.....	60
11.3.	Choix du bon pic de référence.....	61
11.4.	Alignement plaque-radar .....	62
12.	Améliorations futures.....	63
13.	L'installation "idéale" .....	64
14.	Conclusion mesure de SWE .....	66
15.	Bibliographie .....	67
16.	Annexes .....	69
16.1.	Calcul de la longueur de pénétration théorique .....	69
16.2.	Patron d'émission du radar .....	70
16.3.	Détails du calcul de la limite de résolution d'un radar FMCW .....	72
16.4.	Modification de la carte Arduino Due pour mode veille avancé .....	74
16.4.1.	Recherche d'informations .....	74
16.4.2.	Alimenter la broche VDDBU avec une pile CR2032 .....	75
16.4.3.	Utiliser le signal de sortie SHDN du processeur .....	77
16.4.4.	Ajouté un bouton sur la broche FWUP pour forcer le CPU à sortir de veille.....	77
16.4.5.	Contrôler l'alimentation du Radar par la carte.....	78
16.4.6.	Minimiser la consommation électrique des autres composantes.....	78
16.4.7.	Fonctions nécessaires à la mise en veille .....	80
16.4.8.	Récapitulatif de la consommation de la carte Arduino .....	80
16.4.9.	Liste des pièces nécessaires .....	81
16.5.	Application Android, détails de l'interface usager .....	82
16.6.	Exemple de fichier config.ini .....	83
16.7.	Exemple de fichier de données brutes .....	84
16.8.	Protocole de mesure Lac Memphrémagog .....	85

## Remerciements

J'aimerais remercier particulièrement mon directeur de recherche Alain Royer qui a cru en moi et au potentiel et aux retombées de ce projet qui n'aurait pas pu aller aussi bien sans ses encouragements et conseils durant tout le temps de ma maîtrise.

Je remercie également le Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG) et l'entreprise Campbell Scientific Canada pour leur support financier, plus précisément à Jan Hall, notre premier contact chez Campbell qui a cru en nous et qui a convaincu l'entreprise d'investir dans le projet.

Je tiens à remercier les autres étudiants/stagiaires en géomatique, dont (dans le désordre) Gaspard Durieu, Caroline Dolant, Fanny Larue, Bruno-Charles Busseau, Marieke Beaulieu, Frédéric Diotte et Olivier Saint-Jean pour leur aide lors des campagnes de terrain et traitement des données.

J'aimerais aussi remercier le département de Géomatique appliquée, plus particulièrement Patrick Cliche et Gabriel Diab pour l'équipement et conseil techniques, ainsi que mes correcteurs de TEL800 et TEL805, Alexandre Roy et Alexandre Langlois, pour leurs encouragements et précieux conseils.

Finalement, je remercie mes proches, mes amis de l'université et tous ceux qui nous ont encouragés de près ou de loin à réaliser ce projet.

UN GROS MERCI

## 1. Introduction

À chaque hiver aux nouvelles, nous entendons parler que des personnes sont mortes noyées après que leur motoneige ait fracturé la glace. Entre 1991 et 2000, ce sont 246 motoneigistes qui ont perdu la vie de cette façon (La Société canadienne de la Croix-Rouge, 2006) et en 2010 : «Deux randonneurs décèdent par noyade lorsque la glace du fleuve cède sous leurs pieds à Rimouski. [...] Le coroner juge que l'exploitation sécuritaire d'une banquise devrait inclure un système d'information adéquat au sujet de l'épaisseur de la glace [...]» (Bureau du coroner, 2011). Peut-être que si ces personnes avaient à porté de main un dispositif portatif capable de mesurer les caractéristiques de la glace et d'avertir qu'elle n'était pas sécuritaire, la vie de plusieurs d'entre eux aurait pu être sauvée.

Des dispositifs radar pour mesurer l'épaisseur de la glace existent déjà. Comme les radars à impulsion GPR (géoradar ou Ground Penetrating Radar, GPR) (Lalumière, 2011), ils retournent comme information le profil de l'écho réfléchi et nous pouvons déterminer l'épaisseur de la glace en assumant la vitesse de propagation. Pour une personne qui n'est pas spécialiste du domaine, ces systèmes ne donnent pas une information claire, simple et rapide de la solidité de la glace. De plus, ces systèmes sont très onéreux et donc il est difficile de les intégrer de série dans un véhicule comme une motoneige. Alors, la première phase de notre recherche a été de trouver une alternative en choisissant un radar plus abordable et de créer une interface simple à utiliser. Nous avons choisi d'utiliser un radar à émission continue à modulation de fréquence (FMCW) dont la technologie est décrite par Griffiths (1990) et Stove (1992). Ce type de radar est plus abordable que les GPR et il a déjà été utilisé avec succès pour extraire le profil de la glace (Brennan & Al., 2013). Il se fabrique maintenant des radars FMCW de petite taille avec une faible consommation électrique permettant une utilisation mobile dans les campagnes de terrain (Koh & al. 2010). Nous estimons pouvoir mesurer l'épaisseur de la glace sèche avec une précision de l'ordre du centimètre, ce qui est suffisant pour estimer le potentiel de danger de l'utilisateur.

Par la suite, les expériences effectuées avec le radar et la lecture de certaines publications scientifiques (Tiuri & Al., 1984) (Marshall, Koh, & Al., 2012) (Vuyovich & Al., 2014) nous ont donné l'idée d'utiliser le système pour mesurer la densité de la neige à partir de son indice de réfraction dans les micro-ondes. À l'échelle d'un pays, la neige est bien plus qu'une simple substance froide qui tombe et qui recouvre le sol. Elle est à la fois un réservoir d'eau douce sous forme solide et les variations spatiales de son accumulation témoignent de la complexité du transport de l'eau par les courants atmosphériques à l'échelle planétaire (Derksen & Al., 2005). Le manque ou le surplus de neige d'une région à l'autre peut être la cause de sécheresses ou d'inondations dans les régions avoisinantes (Ferraro & Al., 1996).

Conscient de cette importance, beaucoup d'efforts et d'argent ont été investis dans l'étude de la neige, allant de la simulation informatique (Proksch & Al., 2015) jusqu'à la technologie satellitaire de pointe pouvant estimer le couvert nival à partir de l'espace (Roy & Al., 2016) (Hallikainen & Jolma, 2002). Mais pour bien corrélérer ces simulations ou mesures spatiales de grande envergure avec la réalité, plusieurs campagnes de mesure sur le terrain ou capteurs de densité de neige sont installés à travers le pays

(Marshall, Koh, & Al., 2012). Un de ces types de capteurs est appelé G-MON<sup>1</sup>. Ce capteur se base sur la variation du rayonnement gamma qui émerge naturellement de la terre pour estimer la masse de neige, ou son équivalent en eau (SWE), présente sur le site. Développé par Hydro-Québec et fabriqué par Campbell Scientific Canada, la précision d'un tel capteur est de l'ordre de 15% et peut mesurer jusqu'à 600 mm de SWE. Il fonctionne 24h/7j ce qui lui fait consommer beaucoup d'énergie et nécessite une grande quantité de batteries et de grands panneaux solaires pour le faire fonctionner un hiver complet en région nordique éloignée.

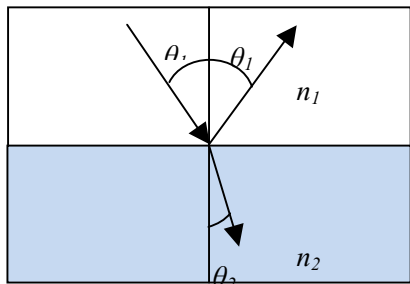
Ainsi, la deuxième phase du projet a été de développer une méthode pour utiliser un radar FMCW pour déterminer le SWE lors de campagnes de terrain durant l'hiver 2016.

Après la section cadre théorique, ce mémoire est divisé en deux parties, l'une traitant de la mesure de l'épaisseur de la glace à l'aide d'un radar FMCW, l'autre décrivant une méthode pour utiliser un radar FMCW pour mesurer la densité moyenne de la neige et en extraire le SWE.

## 2. Cadre théorique

### 2.1. Coefficient de réflexion et de transmission<sup>2</sup>

Du point de vue de la physique, les équations de Fresnel nous donnent les coefficients de transmission ( $t$ ) et de réflexion ( $r$ ) d'une onde électromagnétique en polarisation horizontale ( $H$ ) et verticale ( $V$ ) à la frontière de deux matériaux avec des indices de réfraction différents ( $n_1$  et  $n_2$ ) :



$$r_H = \left| \frac{n_1 \cos \theta_1 - n_2 \cos \theta_2}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \right| \quad r_V = \left| \frac{n_1 \cos \theta_2 - n_2 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2} \right|$$

$$t_H = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_1 \cos \theta_1 + n_2 \cos \theta_2} \quad t_V = \frac{2n_1 \cos \theta_1}{n_2 \cos \theta_1 + n_1 \cos \theta_2}$$

Figure 1 : Définition des angles  $\theta_1$  et  $\theta_2$

Pour une onde incidente perpendiculaire à la surface ( $\theta_1 = 0$ ), la loi de Snells-Descartes ( $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$ ) nous dit que l'angle de l'onde transmise sera aussi égal à 0, peu importe les indices de réfraction des milieux. Ce qui simplifie les équations de Fresnel :

$$r_H = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right| = r_V \quad \text{et} \quad t_H = \frac{2n_1}{n_1 + n_2} = t_V \quad \text{Éq. 1}$$

<sup>1</sup> Capteur CS725 de Cambell Scientific Canada

<sup>2</sup> (Griffiths D. J., 2009)



## 2.2. Propriété de la neige

Selon l'article de Tiuri & al. (1984), la partie réelle de la constante diélectrique de la neige (sèche) ( $\epsilon'$ ) dans le domaine des micro-ondes (de 0.85 à 12.6 GHz) suit une courbe légèrement quadratique, presque linéaire et qui aurait la relation suivante (Figure 2):

$$\epsilon'_d = 1 + 1.7\rho_d + 0.7\rho_d^2 \quad \text{Éq. 2}$$

Où  $\rho_d$  est la densité de la neige en g/cm<sup>3</sup>.

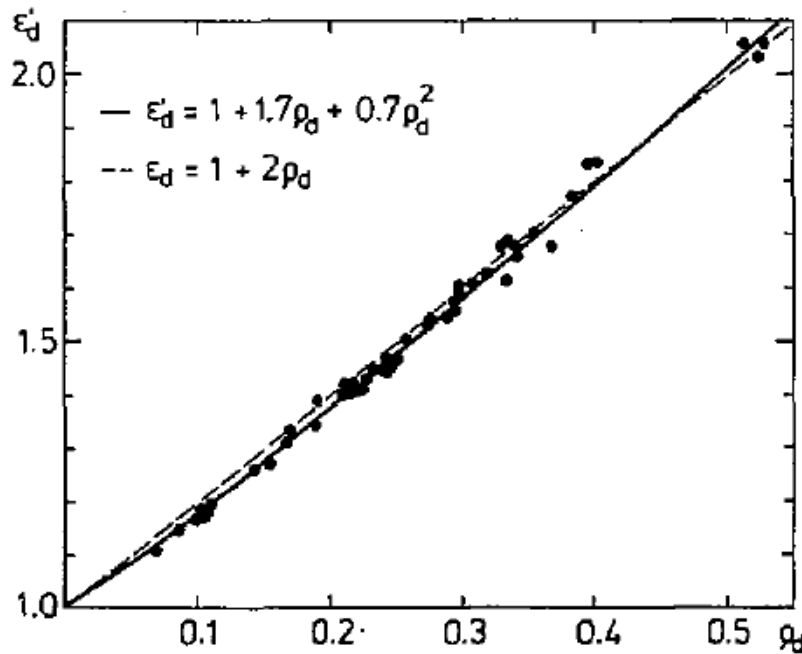


Figure 2 : Relation entre la densité de la neige (g/cm<sup>3</sup>) et sa constante diélectrique réelle (identifiée par  $\epsilon'_d$  dans ce graphique) dans les micro-ondes. (Tiuri & Al., 1984)

Comme il y a une relation entre l'indice de réfraction ( $n$ ) et la constante diélectrique complexe du milieu, il est possible de retrouver la densité de la neige à partir de cet indice, mais seulement si nous connaissons à la fois la partie réelle ( $\epsilon'$ ) et imaginaire ( $\epsilon''$ ) de la constante diélectrique.

$$n = \sqrt{\epsilon' + j\epsilon''} \quad \text{et} \quad \epsilon' = n_r^2 - n_i^2 \quad \epsilon'' = 2n_r n_i \quad \text{Éq. 3}$$

L'étude de Tiuri se concentre sur des fréquences inférieures à 13 GHz. Mais comme le radar étudié se situe à 24 GHz, il est nécessaire de se demander si les propriétés électriques de la neige changent à des fréquences aussi hautes. Le Tableau 1 suivant, extrait du périodique « Applied optics » (Sadiku, 1985) montre une extrême stabilité de l'indice de réfraction réel ( $n_r$ ) entre 0.6 et 300 GHz pour la neige sèche. De plus, la partie imaginaire de l'indice de réfraction ( $n_i$ ) est environ 10<sup>4</sup> fois plus petite que la partie réelle. Ce qui permet de la négliger et d'obtenir la simple relation  $n = \sqrt{\epsilon'}$  et d'avoir finalement la relation suivante entre l'indice de réfraction et la densité :

$$\rho_d = \frac{-1.7 + \sqrt{2.89 + 2.8(n^2 - 1)}}{1.4} \quad \text{Éq. 4}$$

Table IV. Refractive Index of Snow at 0°C Temperature				
Frequency (GHz)	Refractive index			
	Dry snow ( $U = 2, W = 0.05\%$ )	Moist snow ( $U = 8, W = 1\%$ )	Wet snow ( $U = 20, W = 7\%$ )	Watery snow ( $U = 10^3, W = 25\%$ )
0.6	$1.016 + 2.458 \times 10^{-4}i$	$1.123 + 2.073 \times 10^{-3}i$	$1.655 + 9.304 \times 10^{-3}i$	$4.829 + 0.1544i$
0.8	$1.016 + 2.015 \times 10^{-4}i$	$1.123 + 1.809 \times 10^{-3}i$	$1.654 + 1.027 \times 10^{-2}i$	$4.823 + 0.1996i$
1.0	$1.116 + 1.730 \times 10^{-4}i$	$1.123 + 1.666 \times 10^{-3}i$	$1.654 + 1.152 \times 10^{-2}i$	$4.815 + 0.2453i$
1.6	$1.016 + 1.264 \times 10^{-4}i$	$1.123 + 1.432 \times 10^{-3}i$	$1.653 + 1.592 \times 10^{-2}i$	$4.783 + 0.3818i$
2	$1.016 + 1.095 \times 10^{-4}i$	$1.123 + 1.552 \times 10^{-3}i$	$1.653 + 1.909 \times 10^{-2}i$	$4.755 + 0.4702i$
3	$1.016 + 8.606 \times 10^{-5}i$	$1.123 + 1.74 \times 10^{-3}i$	$1.652 + 2.729 \times 10^{-2}i$	$4.661 + 0.6764i$
4	$1.016 + 7.420 \times 10^{-5}i$	$1.123 + 2.013 \times 10^{-3}i$	$1.65 + 3.558 \times 10^{-2}i$	$4.542 + 0.8564i$
6	$1.016 + 6.339 \times 10^{-5}i$	$1.122 + 2.651 \times 10^{-3}i$	$1.646 + 5.198 \times 10^{-2}i$	$4.262 + 1.130i$
8	$1.016 + 5.968 \times 10^{-5}i$	$1.122 + 3.33 \times 10^{-3}i$	$1.640 + 6.778 \times 10^{-2}i$	$3.973 + 1.299i$
10	$1.016 + 5.906 \times 10^{-5}i$	$1.122 + 4.015 \times 10^{-3}i$	$1.633 + 8.272 \times 10^{-2}i$	$3.705 + 1.391i$
16	$1.016 + 6.456 \times 10^{-5}i$	$1.121 + 5.994 \times 10^{-3}i$	$1.605 + 0.1209i$	$3.091 + 1.424i$
20	$1.016 + 7.066 \times 10^{-5}i$	$1.120 + 7.197 \times 10^{-3}i$	$1.584 + 0.1402i$	$2.816 + 1.366i$
30	$1.016 + 8.786 \times 10^{-5}i$	$1.118 + 9.644 \times 10^{-3}i$	$1.528 + 0.1686i$	$2.390 + 1.180i$
40	$1.016 + 1.043 \times 10^{-4}i$	$1.116 + 1.126 \times 10^{-2}i$	$1.479 + 0.1764i$	$2.158 + 1.016i$
60	$1.016 + 1.297 \times 10^{-4}i$	$1.111 + 1.252 \times 10^{-2}i$	$1.411 + 0.1643i$	$1.925 + 0.7793i$
80	$1.016 + 1.438 \times 10^{-4}i$	$1.107 + 1.226 \times 10^{-2}i$	$1.373 + 0.1434i$	$1.816 + 0.6252i$
100	$1.016 + 1.470 \times 10^{-4}i$	$1.105 + 1.142 \times 10^{-2}i$	$1.350 + 0.1243i$	$1.757 + 0.5191i$
160	$1.016 + 1.3832 \times 10^{-4}i$	$1.101 + 8.696 \times 10^{-3}i$	$1.321 + 0.0854i$	$1.684 + 0.3400i$
200	$1.015 + 1.248 \times 10^{-4}i$	$1.100 + 7.325 \times 10^{-3}i$	$1.313 + 0.0699i$	$1.665 + 0.2753i$
300	$1.015 + 9.538 \times 10^{-5}i$	$1.099 + 5.153 \times 10^{-3}i$	$1.305 + 0.0477i$	$1.646 + 0.1859i$

574 APPLIED OPTICS / Vol. 24, No. 4 / 15 February 1985

Tableau 1 : Indices de réfraction de la neige pour différentes fréquences micro-ondes (tiré de Sadiku, 1985)

### 2.3. Propriété de la glace

La glace que nous retrouvons sur nos lacs est de type ordinaire ( $I_h$ ) (Chaplin, 2000). Elle a une constante diélectrique relative réelle ( $\epsilon'$ ) de 3.17, très stable en fréquence entre 10 MHz et 1 THz (avec une légère dépendance en température) (Matzler & Wegmuller, 1987). Il est possible avec cette constante d'estimer le coefficient de réflexion ( $r_H, r_V = 0.28$ ) et de transmission ( $t_H, t_V = 0.72$ ) à l'aide de l'indice de réfraction de la glace ( $n_2 = \sqrt{\epsilon'} \cong 1.78$ ).

La partie imaginaire de la constante diélectrique quant à elle dépend de la fréquence et détermine l'absorption et la longueur de pénétration (voir Figure 3). En tenant compte de la fréquence centrale du radar de 24 GHz, nous estimons à 1.62 mètre la longueur de pénétration dans la glace à l'aide de la formule de Rees (2012) (détails en annexe) ou bien il peut être plus simple de se référer au graphique suivant (Figure 3), tiré du même ouvrage. Comme l'onde doit effectuer un aller-retour, il faut diviser par deux cette longueur pour déterminer l'épaisseur maximale que le radar peut mesurer.

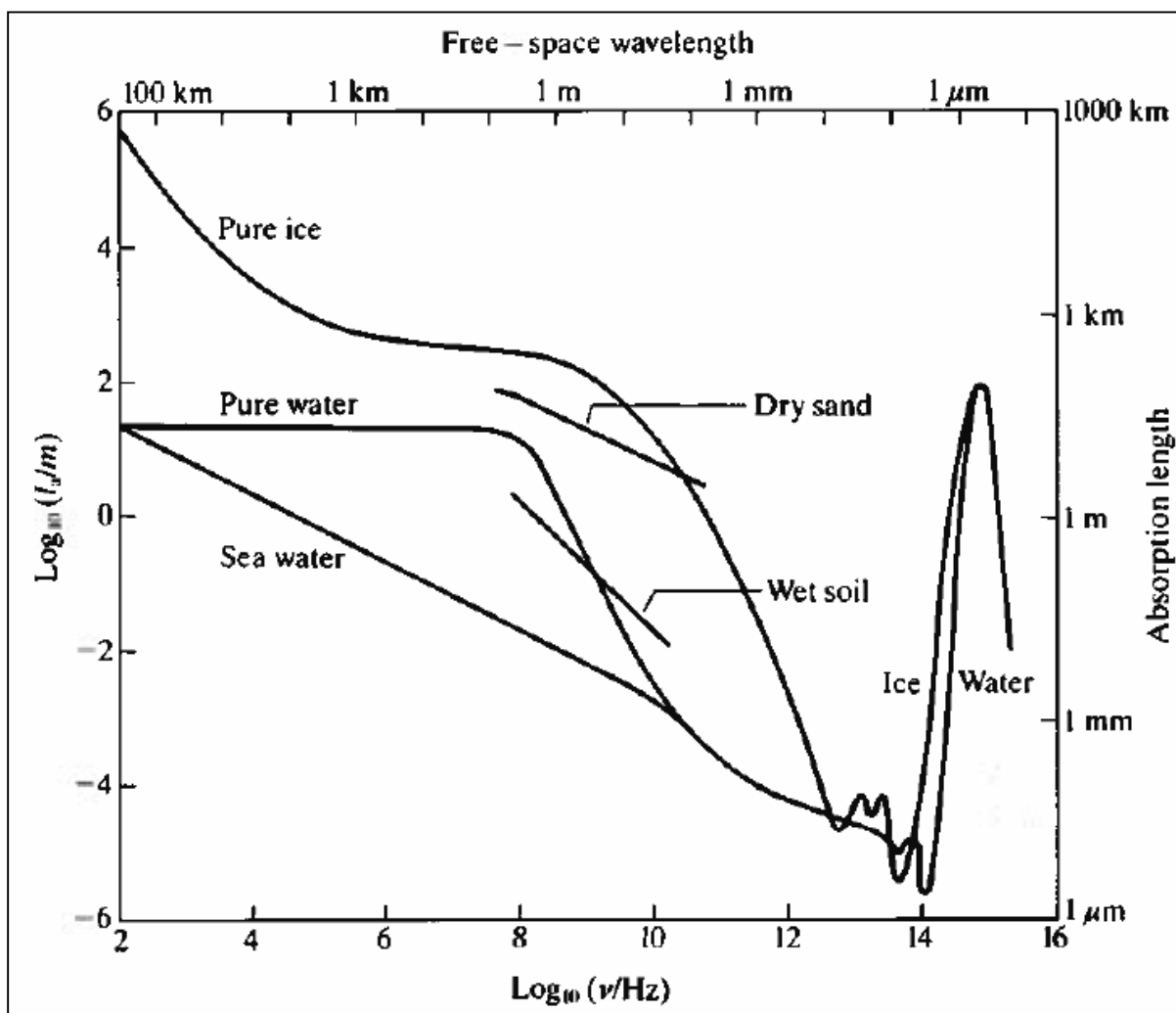


Figure 3 : Longueur de pénétration en fonction de la fréquence (Rees, 2001)

Dans le reste du document, il sera question de distance réelle et de distance optique. La distance réelle est celle que nous pouvons obtenir avec une règle tandis que la distance optique correspond à la distance équivalente que l'onde parcourrait dans le même temps si elle était dans un milieu d'indice 1. Lorsque le radar effectue des mesures dans l'air, la distance optique et réelle sont les mêmes.

### 3. Expérimentations scientifiques antérieures

Selon la documentation consultée (Tableau 2), les recherches sur et avec les radars à glace sont surtout utilisées pour mesurer les glaciers dans les montagnes ou les glaciers polaires. Les chercheurs construisent souvent eux-mêmes leur radar pour avoir de meilleures caractéristiques de mesure (puissance, largeur de bande).

Ci-contre un tableau résumant les différentes caractéristiques des radars utilisés pour l'étude des glaces ou de la neige :

Année	Chercheurs	Larg. de bande/ Fréq. centrale	Détails
<b>2003</b> <b>Figure 4</b>	Kanagaratnam, Markus, Lytle & Heavey	LB : 6 GHz FC : 5 GHz	Expédition sur la mer antarctique pour valider les mesures d'épaisseur de neige par émission de micro-ondes passive
<b>2008</b>	Heilig, Schneebeli & Eisen	GPR 800MHz, 900MHz & 2GHz	Utilisation de radar face vers le haut pour mesurer la densité et la stratigraphie de la neige.
<b>2010</b> <b>Figure 5</b>	Koh, Lever, Arcone, Marshall & Ray	FC#1: 6 GHz LB #1: 8 GHz FC#2 : 0.4 GHz	Deux radars (#1 FMCW, #2 GPR) montés sur un robot pour la détection de crevasses sur le glacier de l'Antarctique
<b>2011</b> <b>Figure 6</b>	Wang, Zhao, Liu, Yu & Fang	LB : ? FC : 0.125 GHz	Expédition avec un radar « haute définition » sur le glacier Laohugou No. 12.
<b>2012</b> <b>Figure 7</b>	Marshall, Gleason, Heilig, Koh & Sturm	LB#1: ? FC#1: 0.8 GHz LB#2: 10 GHz FC#2: 13 GHz	Expédition mesurant l'épaisseur de neige au bassin Senator Beck, Colorado. Radar #1 : Géoradar commercial et Radar #2 : radar FMCW modifié.
<b>&gt;2012</b> <b>Figure 8</b>	MALÅ Geoscience	LB : ? FC : 1.6 GHz	Radar GPR commercial vendu pour caractériser les routes de glace.

Tableau 2 : Résumé non exhaustif des radars utilisés pour l'étude des glaces ou de la neige. FC = Fréquence centrale, LB = Largeur de bande.



Figure 4 : Radar à neige tiré le long d'un transect sur de la glace de mer en Antarctique. Septembre 2003 (Kanagaratnam, Markus, Lytle, & Heavey, 2007)

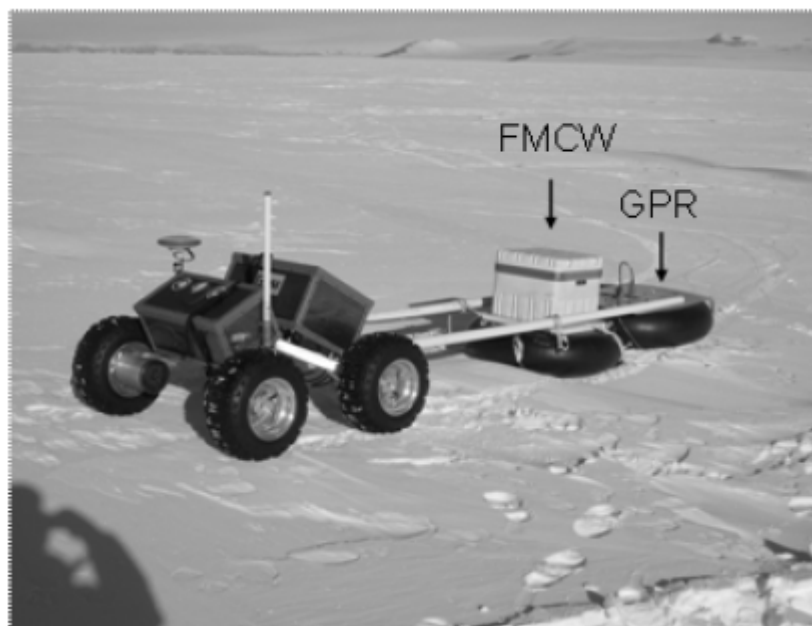


Figure 5 : Le robot Yeti tirant un radar FMCW et un radar GPR sur la calotte antarctique.



Figure 6 : Radar de l'équipe chinoise avant le départ pour les tests sur le terrain



Figure 7 : Expédition radar au bassin Senator Beck, Colorado. Radar #1 : Géoradar commercial en premier plan et Radar #2 : radar FMCW modifié en second plan.



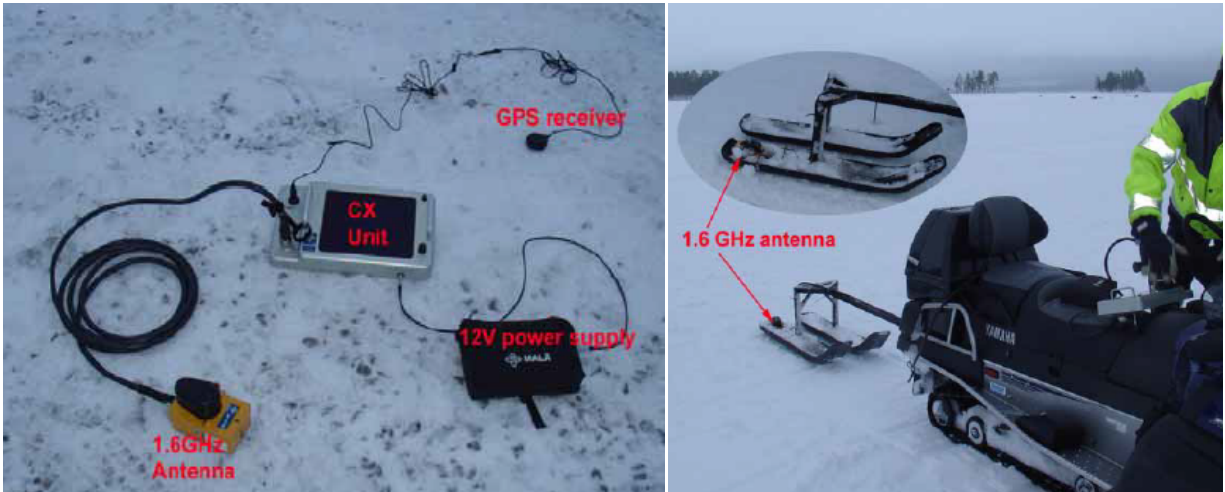


Figure 8 : GPR commercial utilisé pour les routes de glace. (gauche) ce que l'ensemble comprend, (droite) GPR monté sur une motoneige.

Après la revue de ce qui est disponible sur le marché et la recherche effectuée dans ce domaine, nous constatons que les systèmes existants ne répondent pas aux spécifications requises pour un radar embarqué, léger, automatique et autonome. Le dernier radar (Figure 8), vendu par MALÅ Geoscience, est petit et léger, mais ne calcule pas automatiquement l'épaisseur de la glace en temps réel.

## 4. Radar

### 4.1. Propriété du radar FMCW <sup>3</sup>

Le fonctionnement d'un radar FMCW n'est pas le même que celui des radars à impulsions classiques (GPR). Il envoie une onde continue dont la fréquence varie selon une rampe linéaire, autour de sa fréquence centrale. Pour résumer, une onde émise par le radar qui a réfléchi sur un obstacle et qui revient au radar va interférer avec celle qui continue de sortir du radar. Cette interférence est mesurée automatiquement par le radar que nous utilisons et celui-ci la converti en un profil d'amplitude en fonction de la distance, grâce à une transformée de Fourier. Cette distance est estimée en fonction du temps de parcours dans l'air.

La limite en résolution d'un radar FMCW est déterminée par sa largeur en fréquence ( $\Delta f$ ) et la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu ( $v$ ), par la relation suivante (détails des calculs en annexe) :

$$\delta d = \frac{v}{2\Delta f} \quad \text{Éq. 5}$$

Comme notre radar a une largeur de bande de 2.5 GHz et que les mesures sont faites dans la neige sèche ( $v \cong c/1.016$ ), nous avons une limite de résolution d'environ 6 cm. Mais pour bien distinguer deux objets ou surfaces proches sur un profil radar, ils doivent être distancés d'au moins le double de cette résolution

<sup>3</sup> (Wolff, Radar à onde continue modulée en fréquence)

sinon les deux pics vont fusionner dans un seul et il sera impossible de les discerner. Mais pour des réflexions suffisamment séparées, il est possible de raffiner leur position respective par la combinaison d'astuces mathématiques décrites à la section 5.1.

Selon la relation précédente (Éq. 5), la résolution est indépendante de la période de la rampe ( $T$ ), de même que l'amplitude théorique du battement. Il n'y a que la fréquence du battement qui est influencée par cette période où une période plus courte augmente la fréquence et vice versa. En pratique, comme l'analyse de ces battements est effectuée par de l'électronique avec une rapidité finie, la distance maximale de détection est tributaire de cette période.

## 4.2. Radar sélectionné pour étude

Après une première analyse des radars disponibles sur le marché, celui qui répondait le mieux aux trois critères : résolution, pénétration, coût est un radar conçu par la compagnie allemande IMST, destiné à la surveillance routière ou civile. Encapsulé dans un boîtier étanche de très petit format, il présente les caractéristiques suivantes :

- Largeur de bande de 2.5 GHz (résolution de 3.4 cm dans la glace)
- Fréquence centrale de 24 GHz (permet de mesurer jusqu'à 1.5 m)
- Compensation d'amplitude en fonction de la distance
- Coût de départ de 4000 \$
- Communication SPI ou USB
- Tout le traitement numérique du signal (ex : transformée de Fourier) est effectué à l'intérieur même du radar.



Figure 9 : Radar de la compagnie IMST

### 4.2.1. Concept multicanal

Ce radar utilise un convertisseur à quadrature de phase pour numériser le signal sans perte de phase. Le concept de ce convertisseur est d'utiliser deux convertisseurs analogiques à digital synchronisés avec la fréquence du radar. Le signal est envoyé directement à l'un d'eux tandis que le signal envoyé au deuxième est retardé avec un délai équivalent d'un quart de longueur d'onde. De cette façon, le premier convertisseur enregistre la partie en « X » du signal (canal I) et l'autre enregistre la partie en « Y » (canal Q). Il est alors possible de recalculer la phase et l'amplitude mathématiquement à partir de ces deux canaux. Le schéma ci-dessous provient de la page web « Radar Tutorial » (Wolff, Radar Basics - In-phase & Quadrature Procedure) et montre bien le principe.



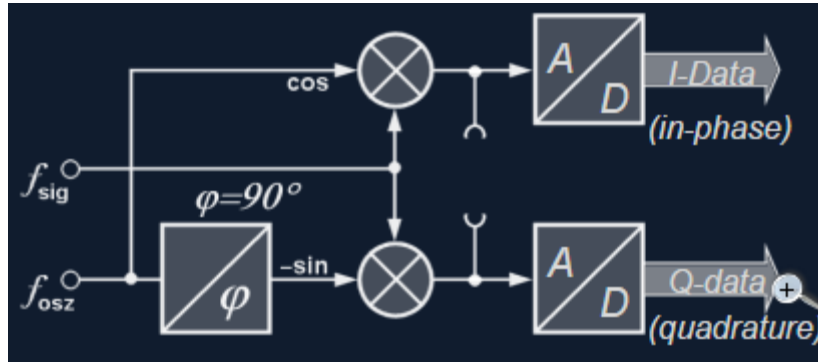


Figure 10 : Concept d'un détecteur à quadrature de phase<sup>4</sup>

De plus, comme ce radar a été conçu pour la surveillance routière, il n'utilise pas une, mais deux antennes réceptrices, ce qui permet de connaître l'angle horizontal d'où provient la réflexion par la différence de phase entre les antennes. Donc deux antennes avec chacune leur canal en quadrature I et Q, ce qui fait un total de quatre canaux à analyser indépendamment par le radar avec une transformée de Fourier. Nous n'avons pas besoin de tous ces canaux, mais comme nous y avons accès, nous les utilisons pour en faire la moyenne et diminuer l'influence du bruit sur les profils.

#### 4.2.2. Période de rampe et « padding »

Comme décrite plus haut (Section 4), la période de la rampe ne change pas la résolution de l'appareil, mais après quelques manipulations, il s'avère par contre que l'amplitude du profil obtenu est influencée par la période, du moins pour de courtes distances (<4 m). Selon le fabricant, la raison de cette variation est que le radar a un filtre « passe-haut » à l'entrée du convertisseur analogique qui diminuerait l'amplitude des battements à basse fréquence, donc près du radar. La valeur par défaut de la période est de 4 ms et sa valeur minimale est de 1 ms. Comme il est préférable d'avoir l'amplitude la plus élevée possible pour minimiser l'influence des parasites, nous avons utilisé la période de 1 ms pour la suite des manipulations.

Une autre option intéressante du radar est l'extrapolation des points par le « padding » de l'échantillonnage du battement. En bref, comme le profil radar est obtenu par une transformée de Fourier discrète, le nombre de points présents dans le profil est exactement la moitié de ceux contenus dans le battement numérisé. L'astuce du « padding » est d'ajouter des zéros à la fin de l'échantillon avant la transformée pour augmenter le nombre de points, ce qui donne proportionnellement plus de points dans le profil. Cette astuce simple permet d'extrapoler jusqu'à huit fois le nombre de points et d'une façon très efficace du point de vue mathématique et des ressources matérielles et ainsi lisser la courbe pour trouver le sommet des pics plus facilement. Cependant elle ne permet pas d'améliorer la résolution théorique (Éq. 5), puisque chaque pic est maintenant convolué avec une fonction « porte » de période T, ce qui élargit les pics proportionnellement au « padding » choisi. Il a aussi le désavantage d'augmenter la quantité de données à traiter et de diminuer l'amplitude relative du profil, ce qui n'est pas grave puisque c'est un effet mathématique, donc le bruit aussi est diminué dans la même proportion. De plus, les matrices de données

<sup>4</sup> (Wolff, Radar Basics - In-phase & Quadrature Procedure)

du radar semblent être limitées à 513 valeurs, ce qui correspond à 4 mètres si le « padding » maximal est utilisé.

La Figure 11 résume les effets de la période et du « padding » sur un bloc de glace en laboratoire. Un « padding » de 1 signifie aucun ajout de zéro sur l'échantillon. L'échelle de la courbe rouge est située à droite du graphique pour plus de visibilité.

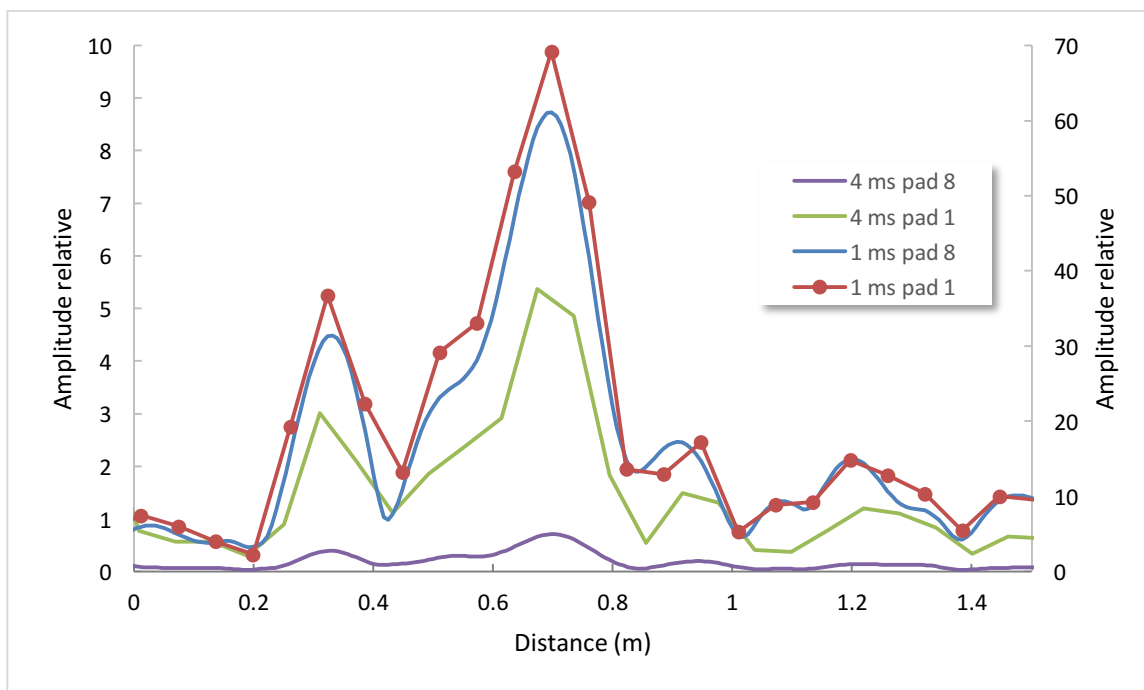


Figure 11 : Comparaison de l'effet de la période de la rampe (T) et du « padding ». La courbe rouge est référencée sur l'échelle de droite.

## 4.3. Programme Python pour prise de mesures V1.0

### 4.3.1. Aperçu

Dans le but de faciliter la prise de mesure en continu et l'observation des profils radars à l'écran, un programme de prise de mesure a été réalisé en python, à partir de la librairie de fonctions fournies par le fabricant. Ce programme permet de visualiser les profils radars en amplitude linéaire (et non en décibel comme le programme de IMST) et il permet d'enregistrer un profil chaque seconde de façon continue. Il a aussi permis de tester en temps réel notre calcul automatique de l'épaisseur de la glace.



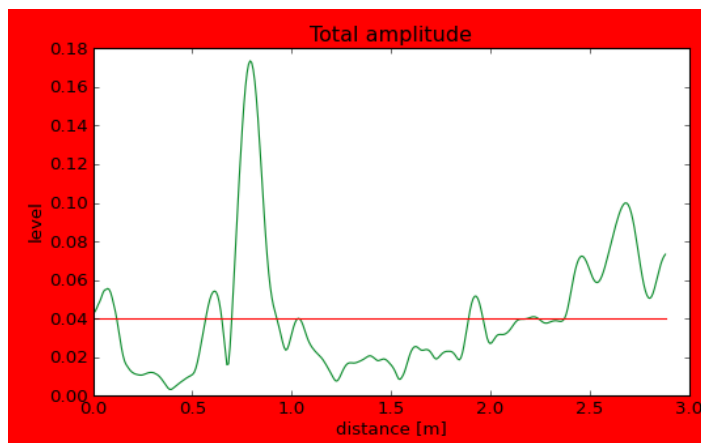
Figure 12 : Programme pour prise de mesure et calcul d'épaisseur automatique

#### 4.3.2. Interface usager

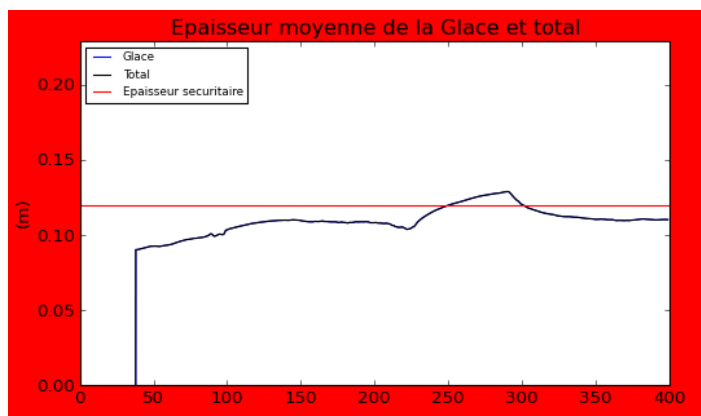
Le programme n'a qu'une seule page. Dans la section en haut à droite se trouvent les informations quantitatives en temps réel sur les résultats de l'algorithme de mesure automatique :

[0.794, 0.598]	- Positions (m) des pics principaux
[0.195]	- Distances (m) entre les pics principaux
Tracking : True	- Indique si en mode apprentissage ou Tracking
Qualité Glace : 0.001	- Facteur de qualité des mesures (Q)
Qualité Neige : 0.0	- Ancien facteur de qualité des mesures de la neige
Tic Eau : 116	- Position du pic d'eau sur le profil radar
Tic Glace : 93	- Position du pic de la surface de la glace sur le profil
Tic Neige : 93	- Position du pic de la surface de la neige sur le profil
Position Eau : 0.794	- Position de l'eau exprimée en mètre
Position Glace : 0.598	- Position de la surface de la glace exprimée en mètre
Position Neige : 0.598	- Position de la surface de la neige exprimée en mètre
Position Eau Moy : 0.794	- Position moyenne de l'eau
Position Glace Moy : 0.598	- Position moyenne de la surface de la glace
Position Neige Moy : 0.598	- Position moyenne de la surface de la neige
Épaisseur Glace : 0.11	- Calcul de l'épaisseur de la glace (m)
Épaisseur Neige : 0.0	- Calcul de l'épaisseur de la neige (m)
Épaisseur Glace Moy : 0.11	- Moyenne des 10 dernières épaisseurs de glace
Épaisseur Neige Moy : 0.0	- Moyenne des 10 dernières épaisseurs de neige

Le graphique en bas à gauche est le profil en temps réel en distance optique à partir du radar et la valeur de seuil (ligne rouge) détermine quels pics ont une amplitude assez importante pour être considérés.



Le graphique en bas à droite de la Figure 22 est le profil temporel des 400 dernières valeurs de l'épaisseur de la glace en bleu, de l'épaisseur total (glace + neige) en noir et du seuil d'épaisseur de sécurité en rouge. L'arrière plan du programme devient rouge si l'épaisseur de la glace calculée est inférieure au seuil de sécurité, tandis qu'elle devient verte lorsque supérieure. Le fond reste gris lorsque l'algorithme est incapable de calculer l'épaisseur avec certitude.



Pour démarrer ou arrêter la prise de données, il suffit de cliquer sur le bouton « Start Rec » dans la section en haut à gauche de l'écran ou sur la touche « R » au clavier. Le bouton à l'écran devient rouge lors de l'enregistrement.

## 4.4. Carte d'interface autonome V2.0

### 4.4.1. Aperçu

Pour la deuxième saison hivernale, un module de contrôleur radar a été réalisé pour s'affranchir du besoin d'utiliser un ordinateur portable sur le terrain et dans le but de concevoir un appareil autonome compact. Il est basé sur la carte [Arduino Due](#), disponible sur le marché. Cette carte a été choisie pour son processeur ATMEEL AT91SAM3X8E, 32 bits à 84 MHz très efficace et peu énergivore. Il possède deux banques de

mémoire RAM (64k et 32k), assez grandes pour mémoriser les profils radars les plus détaillés et sa vitesse d'exécution peut traiter ces données 32 bits en temps réel.

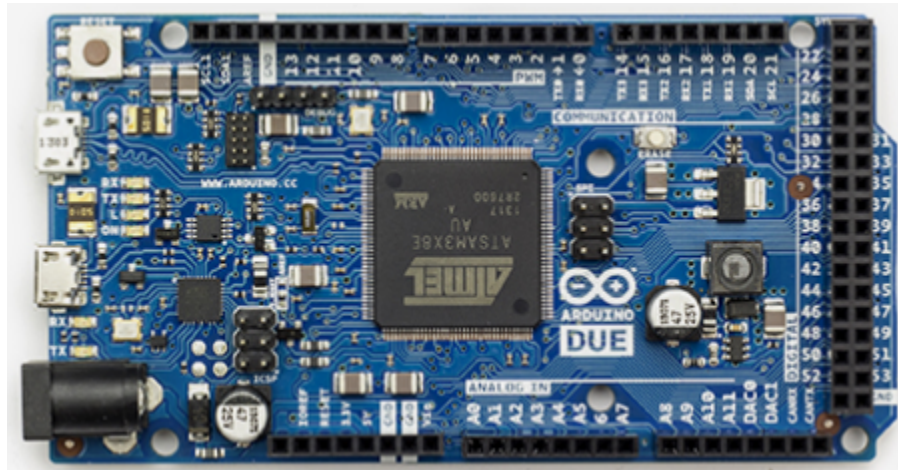


Figure 13 : Carte Arduino Due, utilisé comme contrôleur de radar autonome

#### 4.4.2. Interface Radar

Le Radar communique avec le monde extérieur par son Interface périphérique série (SPI), qui était convertie en USB avec un convertisseur pour être utilisée avec un ordinateur. Nous avons donc choisi d'utiliser le port SPI disponible sur la carte Arduino pour communiquer directement avec le Radar. Les spécifications du Radar montrent qu'il peut communiquer avec une vitesse de 2 MHz, mais nous avons pu augmenter la vitesse jusqu'à 6 MHz sans erreur avec un câble d'une longueur de 60 cm.

#### 4.4.3. Enregistrement des données

Nous avons ajouté un lecteur de carte micro-SD pour y enregistrer les données sous le format Valeurs séparées par virgule (CSV). Un fichier config.ini peut être ajouté dans le répertoire racine de la carte pour changer les paramètres de base du système comme la largeur de bande du radar ou son « padding ». Des exemples de ces fichiers sont disponibles en Annexe. Par contre, il utilise le même port de communication SPI que le radar et la longueur des fils entre la carte et le radar influence la vitesse maximale de communication avec la carte SD. Sans radar, nous pouvons atteindre 48 MHz, mais avec les capacités parasites du câble de communication du radar, nous sommes limités à 42 MHz.

#### 4.4.4. Interface usager

Comme il n'y a plus d'écran pour visualiser le bon fonctionnement et les profils en temps réel, une carte de communication Bluetooth a été ajoutée à la carte Arduino. Nous avons conçu un programme compatible Android pour démarrer les acquisitions et voir les profils radars en temps réel. Davantage de détails sur cette interface sont disponibles en Annexe à la section 16.5.

#### 4.4.5. Test de performance lecture radar + écriture carte SD

Nous avons testé les cas extrêmes des performances du système au complet, incluant la lecture radar et le calcul de l'épaisseur de la glace. Nous avons aussi testé l'écriture du profil sur la carte SD en plus, au cas où il serait utilisé en mode mobile avec enregistrement. La distance maximale sélectionnée pour les tests est de 8 mètres. Le mode le plus lourd est le mode avec un remplissage (« padding ») d'un facteur 4 avec l'utilisation des 4 canaux du radar. Le mode le plus léger est le mode sans remplissage (« padding =1 ») avec l'utilisation d'un seul canal.

	Lecture + calcul d'épaisseur	Lecture + calcul + écriture carte SD
<b>Padding =4, 4 ch.</b>	15 profils/sec	6 profils/sec
<b>Padding =1, 1 ch.</b>	48 profils/sec	15 profils/sec

Tableau 3 : Comparaison des performances du système selon ses paramètres de lecture

#### 4.4.6. Consommation électrique

La carte Arduino Due ne consomme pas beaucoup, soit 0.7 Watt, ce qui est parfait pour une utilisation mobile. Toutefois pour l'utiliser dans une station fixe, cette consommation va vider une pile 12V 7Ah en moins de 5 jours. Le microcontrôleur ATMEL supporte un mode veille très avancé, permettant de mettre en veille le processeur et de planifier l'heure et la date de son réveil. Malheureusement, le concepteur de la carte Arduino n'a pas planifié que leurs clients voudraient utiliser ce mode de fonctionnement. Il y a donc certaines broches du microcontrôleur qui ne sont pas utilisées sur la carte et qui sont essentielles pour la mise en veille. Il n'y a pas non plus de fonctions disponibles pour incorporer ce mode dans notre programme. Il a donc fallu que nous modifiions la carte Arduino au niveau de son circuit imprimé et de son alimentation électrique (comme ajouter une pile au lithium) et que nous concevions les fonctions nécessaires pour débloquent les modes de veille avancés du processeur. Après tous ces changements, le système au complet (incluant le radar) consomme 4.7 W en marche et 9.6  $\mu$ W en veille (sur la pile CR2032), ce qui nous donne une autonomie de 8 ans en veille. Avec quatre lectures par jour, une batterie au plomb 12V 7Ah peut durer 14 ans avec la même charge. Les détails de ces changements sont disponibles en Annexe, section 16.4.

### 4.5. Calcul automatique de l'épaisseur de glace et de neige

#### 4.5.1. Dans les conditions idéales

Lorsqu'une onde électromagnétique circule dans un milieu, chaque changement d'indice de réfraction cause une réflexion. Plus le changement d'indice est grand et brusque, plus l'amplitude de l'onde réfléchie est grande. Alors les conditions idéales pour la mesure de l'épaisseur de la glace sont une surface uniforme et lisse sans la présence d'eau sous forme liquide ni en surface, ni prisonnière de la glace, car l'eau sous forme liquide absorbe rapidement l'énergie de l'onde radar.

Comme mentionné à la section 2.3 ci-dessus, l'indice de la glace est stable à 1.78, tandis que celui de l'eau se situe près de 6 pour une fréquence de 24 GHz (Sadiku, 1985). Si les interfaces sont relativement lisses et

perpendiculaires au radar, le signal de réflexion de l'eau sous la glace sera toujours le plus important en terme d'amplitude (~3 fois plus que celui de la glace) et sera notre référence pour la mesure.

Si la glace est homogène, il n'y aura pas d'autre réflexion importante entre l'eau et la surface de la glace. La neige, elle (si présente), peut prendre toute sorte de forme, avec ou sans croûtes de glace, ce qui ne donne aucune certitude sur la forme de son signal dans le profil radar. Finalement, la masse d'air entre le radar et la surface de la neige ou de la glace ne retournera aucune réflexion.

Pour ne pas tenir compte de la présence de faibles variations dans la glace, le programme ne va sélectionner que les pics de réflexion dépassant un seuil d'amplitude minimale. De façon empirique, la moyenne du profil est un bon seuil de référence comme amplitude minimale.

La procédure réalisée pour mesurer l'épaisseur de la glace avec un profil typique est la suivante :

1. Calcul de la moyenne du profil radar.
2. Associer la position de l'eau au pic maximum du profil (en distance optique).
3. Recherche du prochain pic supérieur à la moyenne, à partir de la position de l'eau en se déplaçant vers le radar. S'il en existe un, on lui associe la position de la surface de la glace.
4. Recherche du pic supérieur à la moyenne le plus près possible du radar et qui n'est pas le pic de la glace. S'il existe, on lui associe la position de la surface de la neige.
5. L'épaisseur de la glace en distance optique sera la position de l'eau moins celle de la glace. Pour obtenir l'épaisseur en distance réelle, il faut diviser cette distance par 1.78 qui est l'indice de réfraction de la glace.
6. L'épaisseur réelle de la neige sera la distance optique de la surface de la glace moins celle de la surface de la neige, divisée par l'indice de réfraction moyen de la neige sèche (~1.1 à 1.5).

La Figure 14 suivante montre un profil radar typique de la surface d'un lac gelé avec présence de neige en surface (lac Memphrémagog 26 fév. 2015, point #1). La ligne rouge représente la moyenne du profil, tandis que les points rouge, jaune et vert représentent respectivement la surface de la neige, la glace et l'eau. Avec la méthode de la moyenne pondérée (section 5.1.2), la distance optique des surfaces serait de 0.36 m pour la neige, 0.785 m pour la glace et de 1.71 m pour l'eau. Avec les indices de 1.5 pour la neige (dense soufflée) et de 1.78 pour la glace, nous obtenons 52 cm pour l'épaisseur réelle de la glace et 12.1 cm pour celle de la neige avec amélioration de la précision. Sans cette amélioration, nous obtenons 51 cm pour l'épaisseur de la glace et 16.1 cm pour la neige. La mesure manuelle sur le terrain nous donne  $53 \pm 1$  cm pour l'épaisseur de la glace et 10 cm pour la neige.

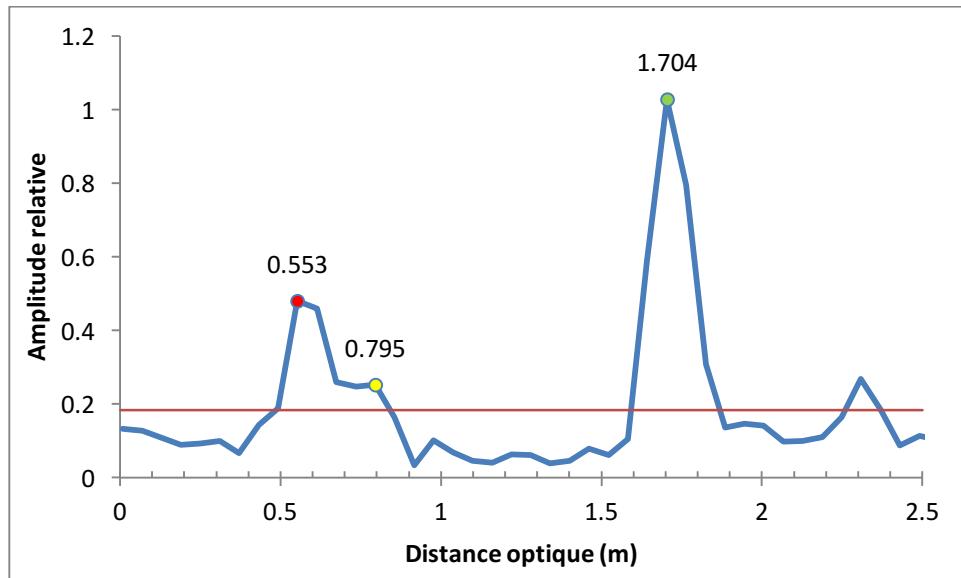


Figure 14 : Exemple de profil radar de la surface d'un lac avec présence de neige (pad=1). Point vert = surface de l'eau, point jaune = surface de la glace, point rouge = surface de la neige

#### 4.5.2. Limitations

Il se peut que les conditions de la neige en surface masquent ou diminuent de façon temporaire la réflexion de la surface de l'eau ou de la glace. Parmi ces conditions, notons la présence d'eau liquide ou de neige mouillée qui absorbe très rapidement le signal radar. À ce moment, la réflexion de l'eau sous la glace peut disparaître et il devient impossible de mesurer l'épaisseur de la glace. Selon nos expérimentations, l'eau liquide en surface ou dans la glace ne retourne pas une réflexion aussi intense que celle sous la glace. Cette eau est souvent mélangée avec la neige ou imbibée dans la glace et a donc rarement une surface lisse avec un changement d'indice brusque qui caractérise celle sous la glace. Avec une application mobile, il est possible de détecter automatiquement le problème si la réflexion la plus élevée est inférieure à la normale pour de l'eau sous la glace. L'application peut alors suspendre temporairement le calcul d'épaisseur s'il ne détectait plus cette réflexion et le réactiver lorsqu'il serait dans une zone plus favorable.

Une autre condition particulière serait d'être placé sur de la glace qui s'étend jusqu'au sol. Dans ce cas, il n'y aurait pas de réflexion d'eau liquide sous la glace. Comme le sol gelé contient beaucoup de glace, il a presque le même indice de réfraction que la glace et n'est pas visible sur le profil. Toutefois du point de vue de la sécurité, si la glace est continue jusqu'au sol, il n'y a pas de risque de noyade.

Finalement, une dernière condition relative à la neige qui peut survenir et nuire aux mesures est si la densité de la neige augmente graduellement jusqu'à atteindre presque celle de la glace. Il n'y aura alors plus de changement d'indice brusque, l'amplitude de la réflexion de la glace passera sous le seuil de détection et le pic de la surface de glace ne sera pas considéré par l'algorithme décrit plus haut. Heureusement, ceci ne devrait pas affecter la présence du pic d'eau sous la glace. Il est alors possible d'estimer l'épaisseur de la glace en ne se fiant que sur la position de l'eau et la hauteur approximative du radar ou de la dernière position connue de la surface de la glace. Cette méthode pourrait permettre d'assurer la sécurité même si les mesures d'épaisseur sont temporairement moins précises.

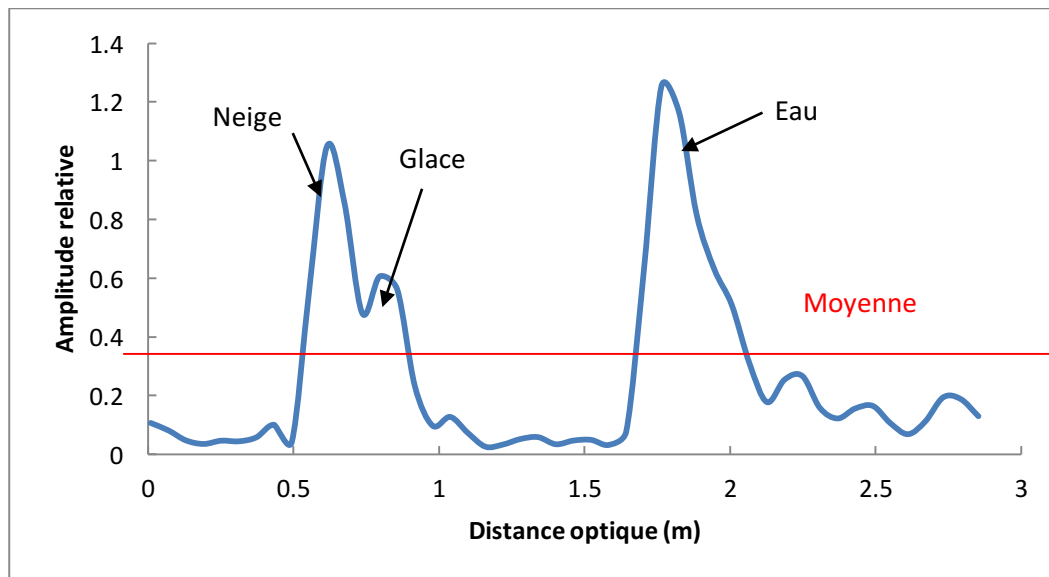


## 4.6. Fonctionnement de l'algorithme de mesure automatique

Nous avons élaboré une méthode pour interpréter au mieux l'écho radar, réalisée selon deux modes, mode « apprentissage » et mode « poursuite » (« Tracking »), choisis selon un critère de qualité.

### 4.6.1. Mode apprentissage

Le mode apprentissage analyse l'écho du radar de la façon suivante : la réflexion (ou pic) la plus élevée est considérée comme celle de l'eau sous la glace, la prochaine réflexion qui dépasse la moyenne en remontant vers le radar est considérée comme celle du dessus de la glace. Si d'autres réflexions sont présentes entre celle de la glace et le radar, la plus proche du radar sera celle du dessus de la neige (les autres sont des sous-couches de neige). Le programme restera dans ce mode jusqu'à ce que le facteur de qualité (voir plus bas) soit suffisamment élevé, ce qui peut représenter environ vingt bons profils radar. Ce mode fonctionne bien avec des profils typiques, mais sera influencé s'il y a présence de cellules d'eau ou de l'humidité en surface car l'amplitude du pic d'eau pourrait être absent ou inférieur au seuil d'amplitude.



### 4.6.2. Mode Tracking

Le mode poursuite (« Tracking ») permet de suivre l'évolution de la position du sommet de chaque pic d'un profil à l'autre. À chaque nouvel écho, il fait une recherche du nouveau maximum à proximité de l'ancienne position en « montant la côte ». En détail, il commence à l'endroit où était situé le dernier maximum, observe l'amplitude de ses voisins immédiats et se déplace du côté le plus élevé jusqu'à ce qu'il arrive au sommet. Ce mode exige un « padding » élevé (8) pour avoir des pas fins entre les valeurs et le programme ne se soucie plus de l'amplitude des pics ni même de la moyenne mais seulement de leurs positions. De cette façon, si des pics temporaires dus à des lentilles d'eau liquide apparaissent entre deux pics principaux, ils seront « invisibles », car le programme ne les traquait pas avant. Si l'amplitude

du pic de l'eau devient inférieure à celle de la neige, mais reste discernable, le programme va quand même considérer cette position comme celle de l'eau.

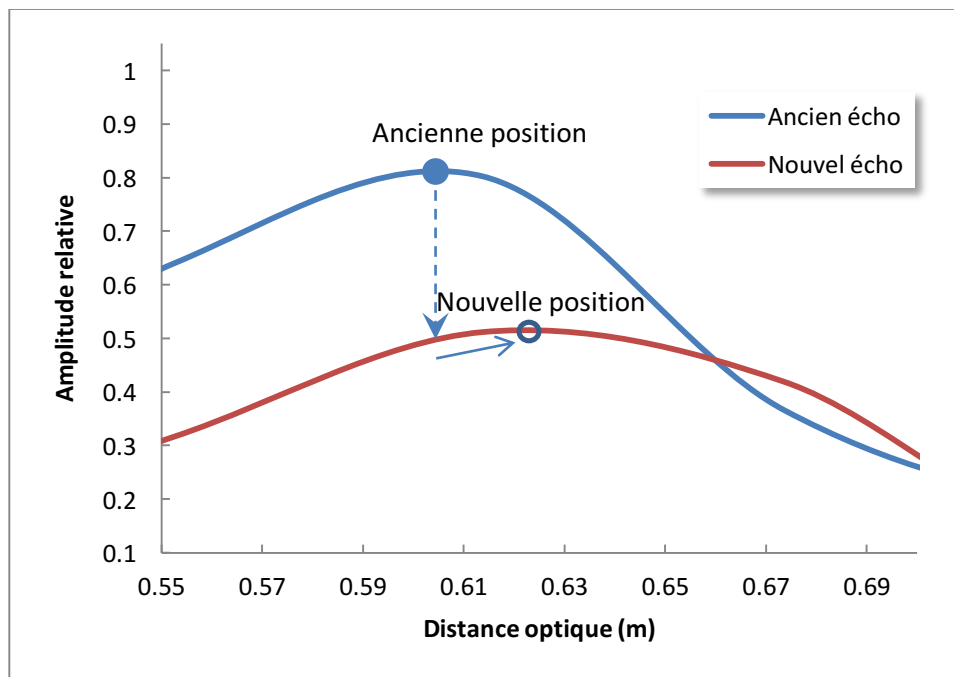


Figure 16 : Exemple du mode Tracking

#### 4.6.3. Facteur de qualité

Ce qui fait passer d'un mode à l'autre, c'est le facteur de qualité (Q), basé sur l'écart type des dix dernières mesures d'épaisseur de glace. Si l'épaisseur de la glace est très stable dans le temps, le facteur de qualité sera très haut (~1), ce qui signifie une bonne stabilité des mesures. Si l'épaisseur varie beaucoup entre plusieurs mesures rapprochées, ce qui peut être causée par une variation de l'angle de visé du radar, la valeur du facteur de qualité va diminuer. Si le programme est en mode poursuite et que le facteur de qualité devient trop bas, le programme quittera ce mode pour retourner au mode apprentissage. À l'inverse, si le facteur de qualité augmente à une valeur suffisamment haute pour s'assurer de la fiabilité des mesures, le programme repassera en mode poursuite.

Comme le facteur de qualité se base sur les épaisseurs, le fait de monter ou descendre le radar ne l'influence pas. À chaque profil où il y a moins de deux pics présents, le programme dégrade volontairement le facteur de qualité. Après plusieurs lectures sans réflexion assez forte pour bien discerner le dessus de la glace, le facteur de qualité sera assez faible pour quitter le mode poursuite et revenir au mode apprentissage.

## 5. Expérimentations en laboratoire

### 5.1. Analyse du radar IMST

Une analyse du radar étudié a été réalisée dès sa réception et des tests simples en milieu contrôlé ont permis de caractériser l'appareil selon ses différentes options et sur des aspects tels que la linéarité de la mesure en fonction de la distance, la limite de résolution de deux surfaces proches l'une de l'autre, etc.

#### 5.1.1. Test de linéarité

Ce test a été effectué pour savoir si le radar donne effectivement une réponse linéaire en fonction de la distance d'un objet métallique placé à moins d'un mètre du radar. Une cible constituée d'une plaque de cuivre de 30 cm x 30 cm a été utilisée pour minimiser la distance de pénétration en surface à moins d'un millimètre pour une plus grande précision. La Figure 19 rapporte la position de la valeur d'amplitude la plus élevée dans le profil de chaque position de la plaque. La pente de la tendance s'approche bien de l'unité, mais il y a présence d'un biais d'environ 13 cm. De plus, la mesure varie en escalier avec un écart type de 2 cm, ce qui correspond à la limite de résolution du radar dans l'air qui ne retourne qu'une valeur à chaque 6 cm.

#### 5.1.2. Amélioration de la mesure linéaire

Avant d'utiliser la fonction de remplissage (« padding ») décrite à la section 4.2.2 qui augmente la quantité de données, nous avons tenté de savoir si nous pouvions utiliser une autre astuce que l'extrapolation qui serait moins gourmande sur le processeur, point important dans un appareil mobile. Comme la mesure de distance de la Figure 19 ne se base que sur la position du maximum du profil radar, il a été tenté d'améliorer la précision en tenant compte des valeurs voisines pour raffiner la position dans un intervalle inférieur à 6 cm. Dans l'exemple de la Figure 17, la valeur maximale se trouve au même endroit pour les distances 35 cm, 37.5 cm et 40 cm, mais avec les valeurs environnantes, il est possible de déduire l'emplacement réel de la réflexion.

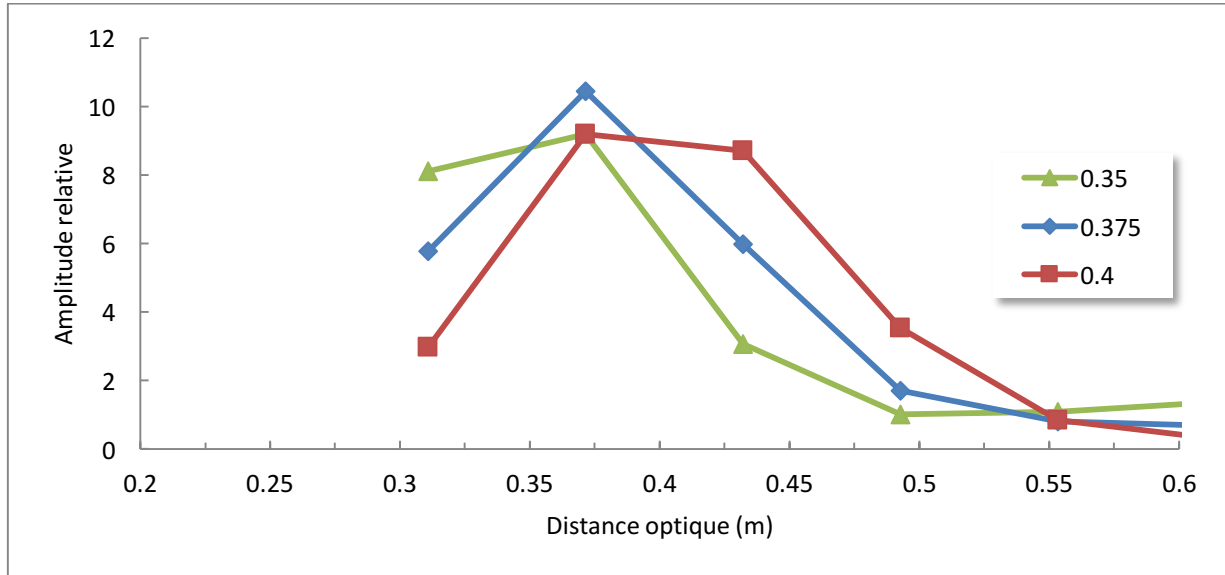


Figure 17 : Trois exemples de pics représentant des distances différentes (35, 37.5 et 40 cm) avec la même position maximale

L'astuce testée est d'effectuer une moyenne pondérée à partir du point avec l'amplitude maximale et de ses deux voisins immédiats pour obtenir une position intermédiaire. Cette méthode est la plus efficace et rapide pour le microcontrôleur choisi, contrairement à une régression linéaire avec ensuite une recherche du sommet, qui demande plusieurs itérations afin d'arriver à un résultat similaire. L'efficacité de calcul est importante pour une mesure rapide de l'épaisseur de la glace sur une motoneige en mouvement. La formule de base est décrite par la relation suivante, où  $D$  représente la position et  $A$  l'amplitude de chaque point autour du maximum à la position  $n$  :

$$d(n) = \frac{\sum_{i=n-1}^{n+1} D(i)A(i)}{\sum_{i=n-1}^{n+1} A(i)} \quad \text{Éq. 6}$$

Des tests ont démontré qu'il semble plus efficace de tenir compte d'un biais minimum ( $A_o$ ) à retirer des amplitudes pour compenser le niveau bas résiduel. De façon empirique, 25% de l'amplitude maximale est une bonne valeur pour  $A_o$ . Si l'amplitude d'un point voisin est inférieure à 25% du maximum, sa valeur est forcée à 0.

$$d(n) = \frac{\sum_{i=n-1}^{n+1} D(i)(A(i) - A_o)}{\left[ \sum_{i=n-1}^{n+1} A(i) \right] - 3A_o} \quad \text{Éq. 7}$$

Avec cette méthode, nous avons toujours un biais de 11.29 cm mais l'écart de l'erreur est amélioré, avec un écart type de 0.97 cm (voir Figure 20).

Si nous combinons cette technique avec le « padding » pour avoir la meilleure précision possible, la distance choisie entre les points correspond au degré de remplissage. Par exemple, pour un « padding » de 8, on prendra le 8<sup>e</sup> voisin de part et d'autre du maximum local. Voici donc la fonction finale :

$$d(n) = \frac{\sum_{i=n-1}^{n+1} D(i * pad)(A(i * pad) - A_o)}{\left[ \sum_{i=n-1}^{n+1} A(i * pad) \right] - 3A_o} \quad \text{Éq. 8}$$

La Figure 18 correspond à un pic obtenu d'une feuille de métal avec une extrapolation de huit fois. Elle montre en vert les points sélectionnés pour la moyenne pondérée. En rouge se trouve une courbe de corrélation gaussienne où le centre se situe à 610 mm. Si la formule précédente (Éq. 8) est appliquée aux trois points verts, le résultat est de 610.307 mm, soit une différence de 0.07 mm avec la régression linéaire.

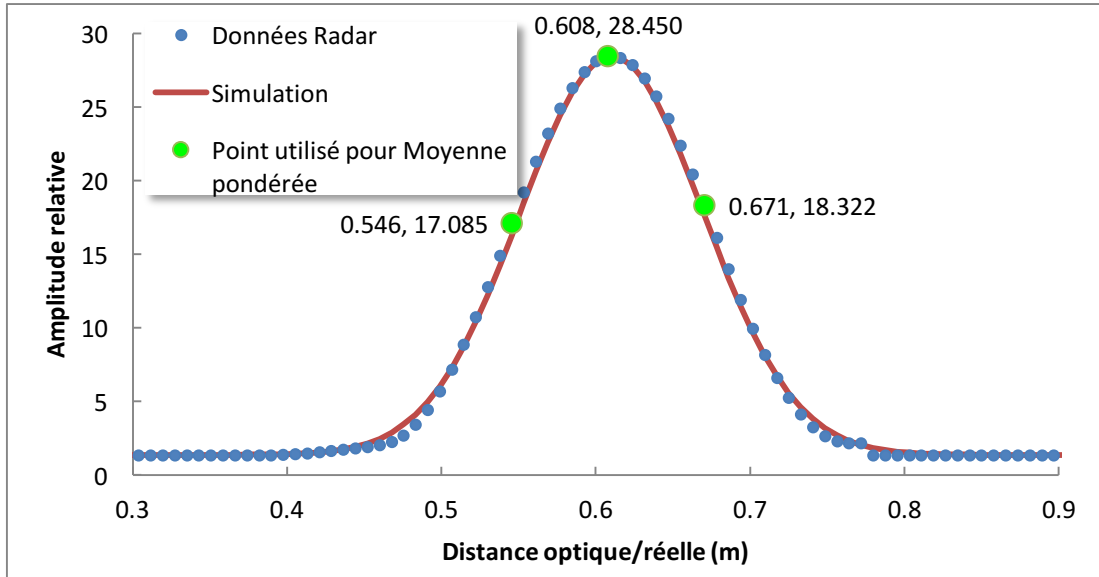


Figure 18 : Exemple de points utilisé pour la moyenne pondérée avec un facteur de remplissage de 8.

Finalement, en corrigeant le biais et en utilisant ces deux astuces mathématiques efficaces et économe en terme de calcul processeur, nous avons pu améliorer de façon significative la précision de la mesure de distance d'un objet métallique fixe. La Figure 21 montre le même test de linéarité, mais en utilisant les deux techniques combinées. Elle démontre une amélioration significative de la précision avec un écart type de 2 mm. Ce qui représente une amélioration d'un facteur dix et correspond à notre limite en ce qui concerne la mesure de distance réelle.

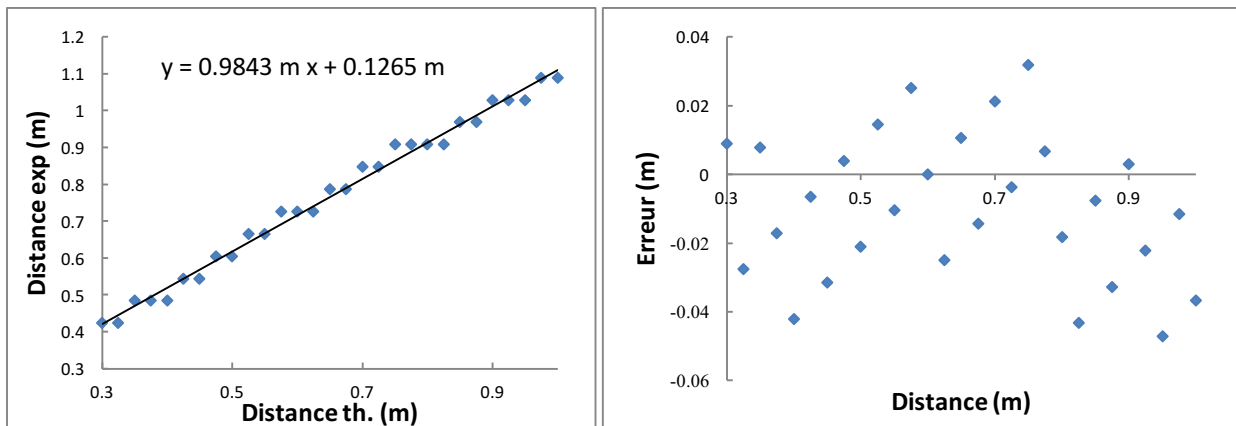


Figure 19 : Gauche, résultat du test de linéarité (pad=1, T=4 ms). Droite, erreur de la linéarité. Écart type : 2 cm

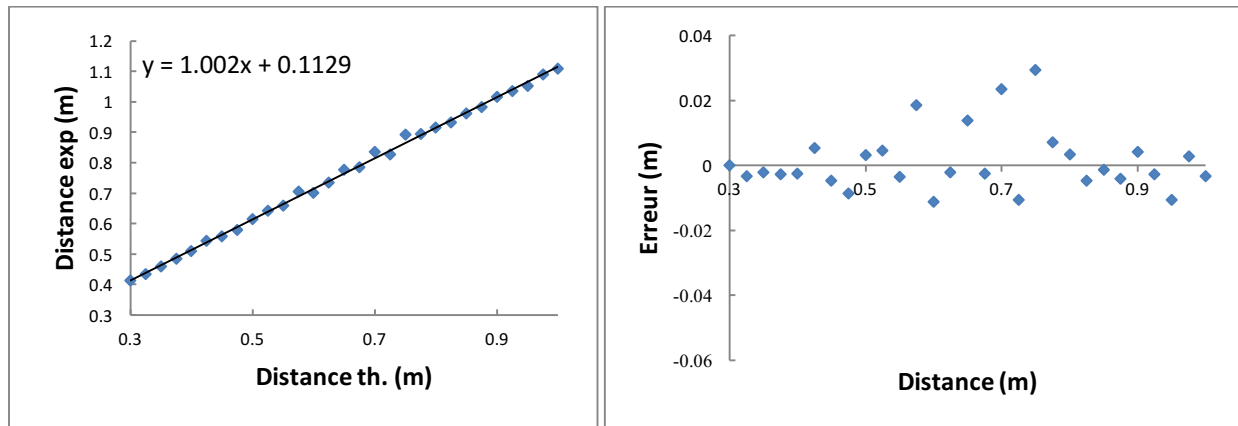


Figure 20 : Gauche, résultat du test de linéarité avec la méthode de la moyenne pondérée. Droite, erreur de la linéarité. Écart type : 1 cm

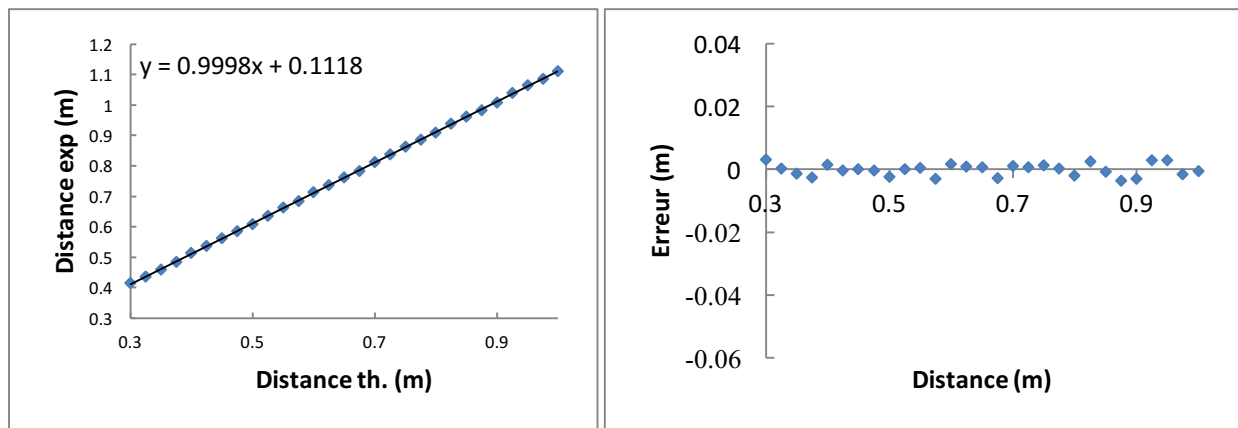


Figure 21 : Gauche, résultat du test de linéarité avec amélioration de la précision. Droite, erreur sur test de linéarité. Écart type : 0.2 cm

### 5.1.3. Test de résolution

Ce test a pour but de connaître la capacité de discerner la présence de deux réflexions relativement proches l'une de l'autre sur un profil radar. Le montage est le suivant :

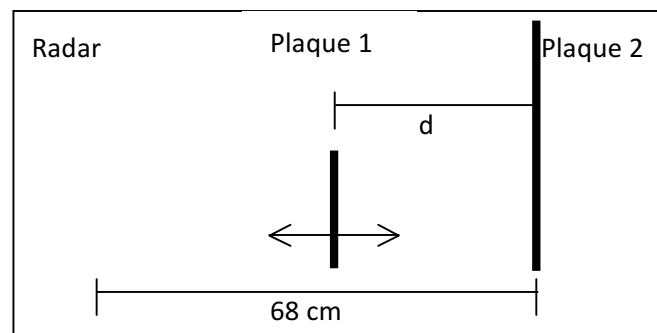


Figure 22 : Montage du test de résolution

La distance entre la plaque de métal #2 et le radar est fixe, tandis que la plaque de métal #1 se rapproche de la plaque #2. La distance  $d$  est la distance séparant les deux réflexions. Les distances ont été déterminées en utilisant la position des deux pics avec l'amplitude la plus élevée de chaque profil. La Figure 23 présente les résultats compilés et démontre qu'en dessous de 15 cm, les mesures s'éloignent

de la distance réelle. Il est donc difficile de distinguer correctement les deux plaques pour une distance inférieure à 15 cm, ce qui correspond à la limite de résolution théorique de 2 x 6 cm dans l'air.

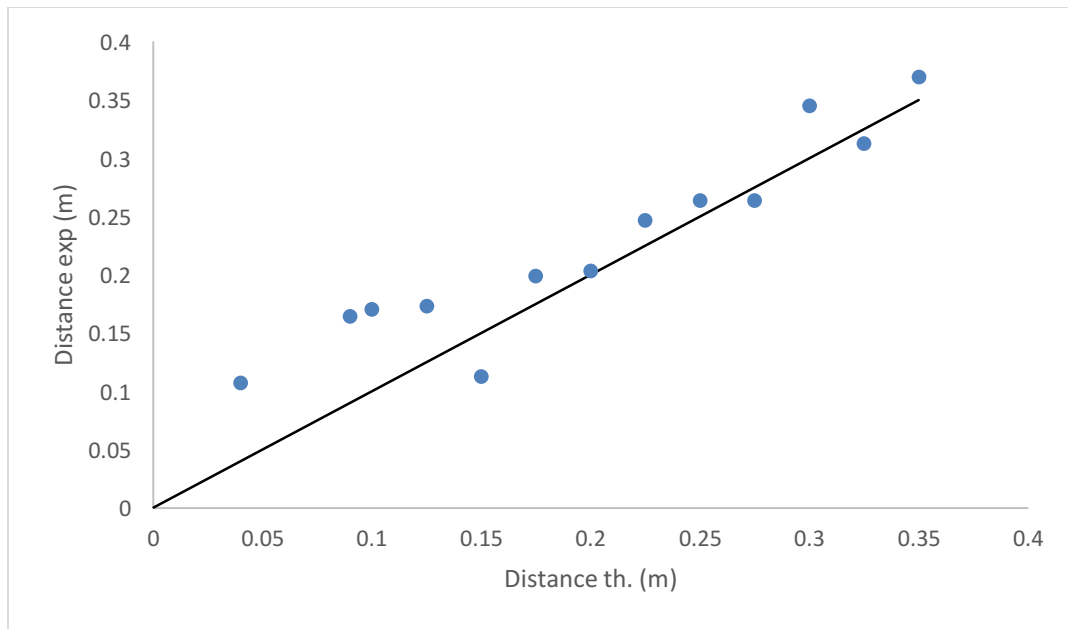


Figure 23 : Résultats du test de résolution. La droite correspond à  $Y=X$ .

# Expérimentations pour la mesure d'épaisseur de glace

## 6. Méthodologie pour la mesure d'épaisseur de glace

La méthode pour la mesure de l'épaisseur de la glace est relativement simple. Il suffit de positionner le radar pour que l'antenne soit perpendiculaire à la surface de la glace, à une distance d'au moins 15 cm. Il peut être fixe sur un trépied déporté ou installé sur un traîneau pour une mesure de transect.

Durant l'automne 2015, avant que les glaces de lac soient suffisamment épaisses pour être sécuritaires, des expérimentations ont été effectuées à l'aide de blocs de glace dans des bacs de plastique. Chaque bac a environ 45 cm de long par 30 cm de large et peut être superposé pour simuler différentes conditions. Voici quatre scénarios testés en laboratoire. Les mesures ont été effectuées sans la fonction d'interpolation du radar (« padding »).

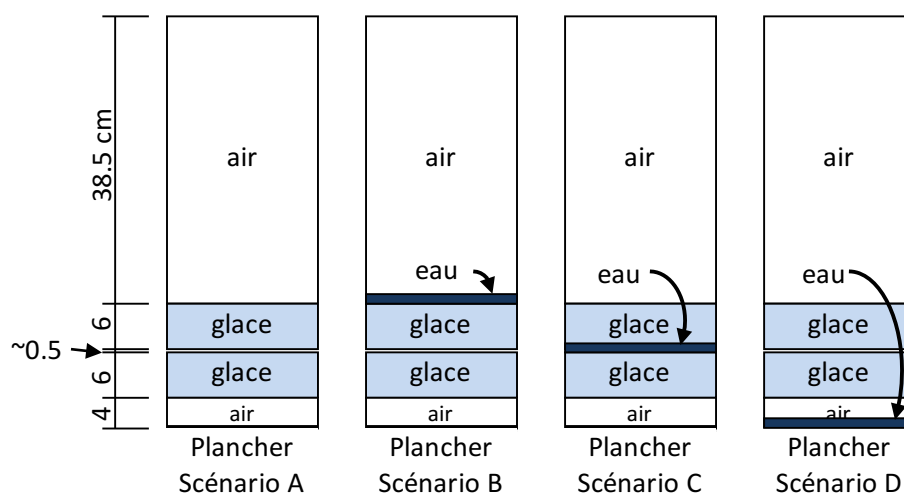


Figure 24 : Différents scénarios testés.

### 6.1. Scénario A

Dans cette configuration, deux blocs de glace de 6 cm se superposent à 4 cm au-dessus du plancher du laboratoire. Il y a une petite lame d'air de 0.5 cm entre les blocs, ce qui fait un total de 12.5 cm. La Figure 25 montre le calcul de l'épaisseur selon la méthode avec la position des maximums seulement (noir) et la méthode utilisant l'amélioration de précision décrite à la section 5.1.2 (vert). Selon la première méthode, nous obtenons une épaisseur de 10.2 cm, tandis qu'avec la 2<sup>e</sup> méthode, nous obtenons une mesure de 12.1 cm, ce qui est beaucoup plus proche de la réalité.



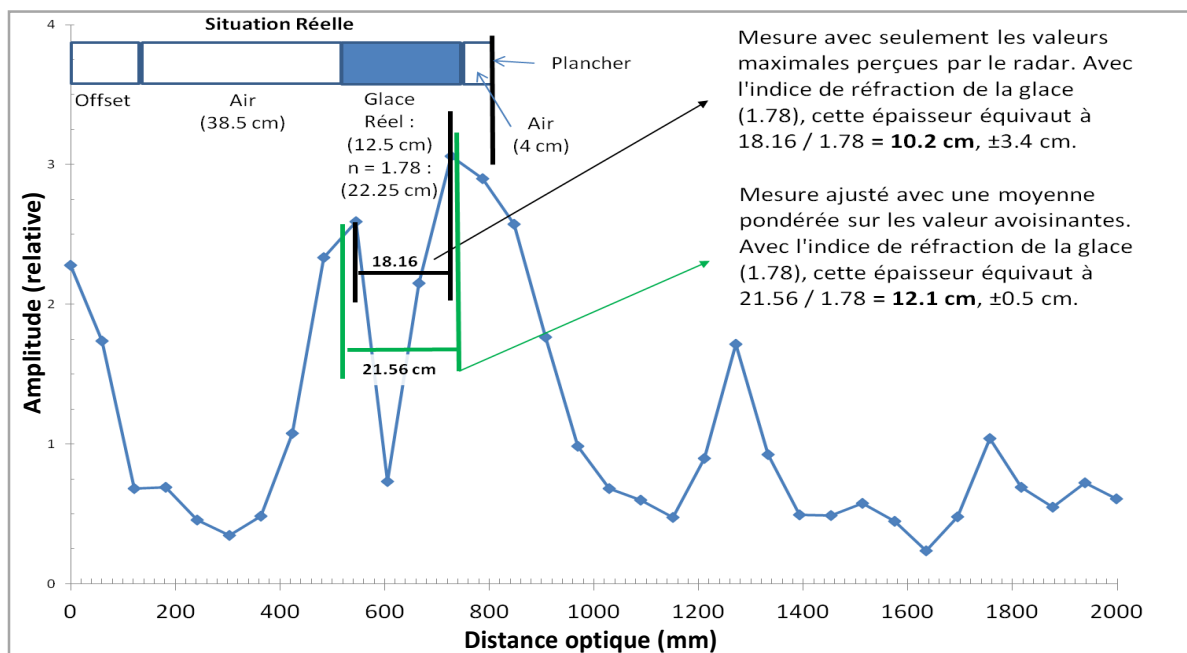


Figure 25 : Résultat du scénario A

## 6.2. Scénario B

Dans ce scénario, il y a présence de 0.5 cm d'eau du robinet à la surface de la glace pour simuler la présence d'eau en surface. La Figure 26 compare le profil obtenu avec celui du scénario A comme référence. La figure démontre la forte réflexion de l'interface air-eau, et aussi la perte quasi totale du signal par la suite. Ce qui confirme le fait qu'il n'est pas possible de mesurer l'épaisseur de la glace avec présence d'eau en surface.

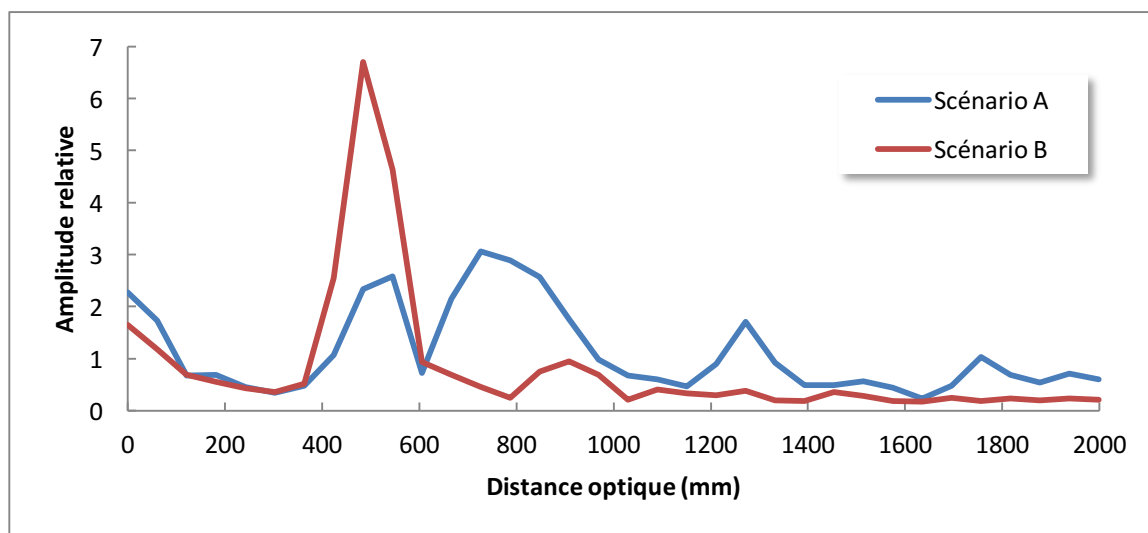


Figure 26 : Comparaison des scénarios A et B

### 6.3. Scénario C

Ce scénario représente une couche de glace de 12.5 cm avec une lentille d'eau au centre. L'eau liquide a une plus faible réflexion qu'au scénario B puisque le changement d'indice glace-eau est plus petit que celle air-eau. Il semble être possible de détecter la réflexion sous le dernier bloc de glace puisqu'il y a un 3<sup>e</sup> pic situé à 800 mm représentant la fin du bloc de glace inférieur. Ce qui signifie que dans ce cas l'onde n'a pas été totalement absorbée par l'eau liquide.

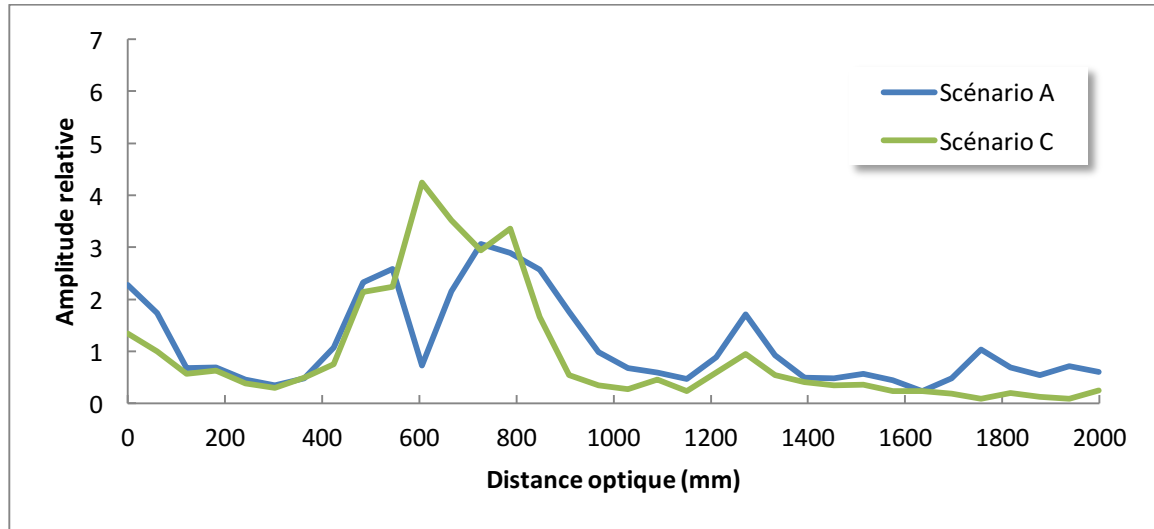


Figure 27 : Comparaison des scénarios A et C

### 6.4. Scénario D

Ce dernier scénario représente une couche de glace de 12.5 cm avec un espace d'air entre la glace et l'eau. Le profil montre une grande réflexion qui pourrait représenter l'interface air-eau, mais sa position est incorrecte et correspondrait à une réflexion située à 38 cm sous la surface du plancher. Son origine nous est encore inconnue.

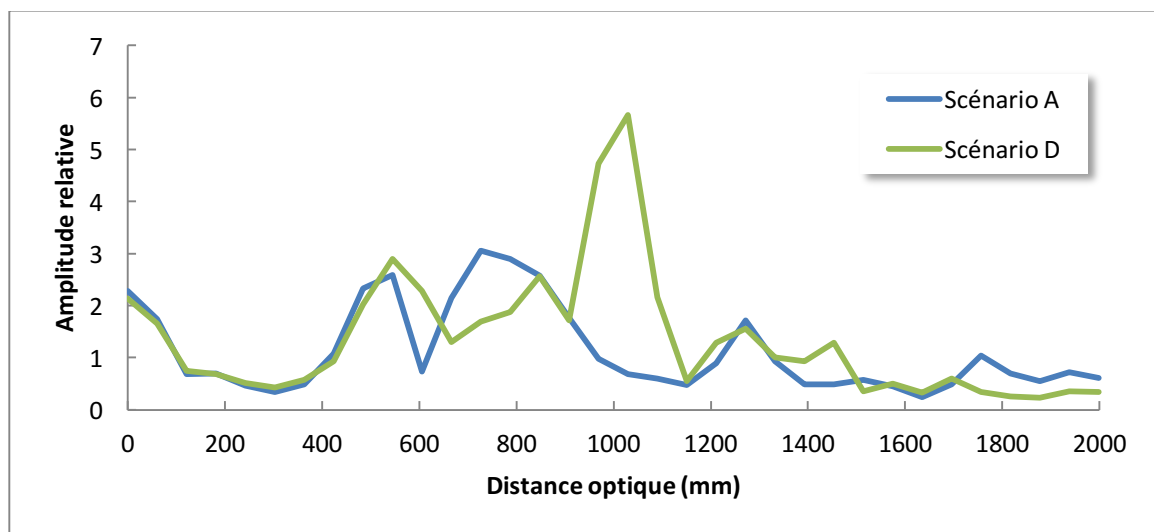


Figure 28 : Comparaison des scénarios A et D

## 7. Résultats

### 7.1. Mesures sur le terrain

Cette section ne contient que quelques exemples illustratifs de toutes les mesures prises sur différents plans d'eau au Québec.

#### 7.1.1. Lac Memphrémagog

Le 26 février, nous sommes allés prendre des mesures radar avec et sans neige, point fixe et transect, sur le lac Memphrémagog. Au départ, 12 points de mesures fixes séparés de 10 m pour un total de 110 m de transect avec neige étaient planifiés, mais dû au manque de temps, nous nous sommes limités à 10 points fixes sans neige (transect sans neige de 90 m). Le détail du protocole de mesure est inclus en Annexe (Section 16.8).

La fonction d'interpolation du radar n'était pas activée, puisque découverte plus tard. Le résultat des transects est présenté sur les figures suivantes, où l'axe vertical est la distance optique en mètre et l'échelle de gris représente l'amplitude relative du signal reçu. Il est difficile d'y mesurer l'épaisseur de la glace, mais il est possible de voir la présence de la surface de la neige (~0.8 m) et l'eau sous la glace (~2 m). Il est aussi difficile de positionner les mesures manuelles sur les graphiques puisque les mesures ne sont pas géoréférencées.

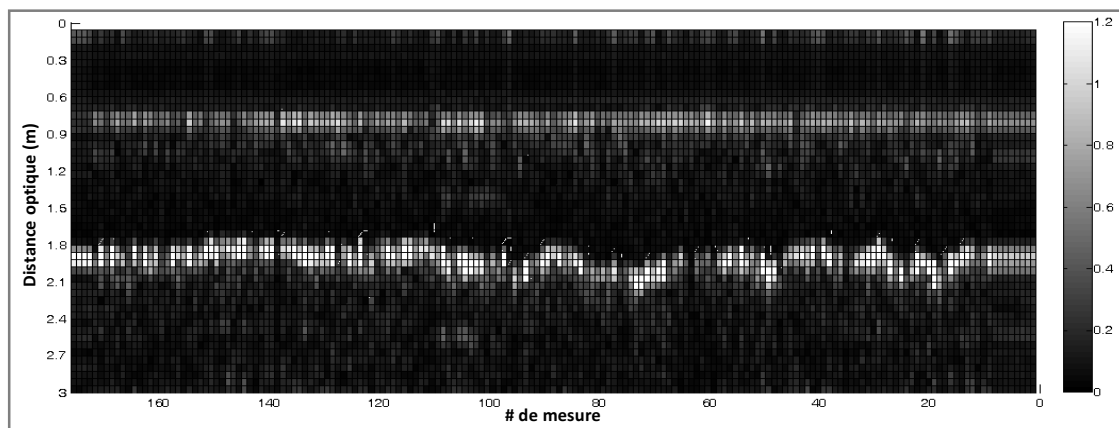


Figure 29 : Transect Memphrémagog avec neige (110m)

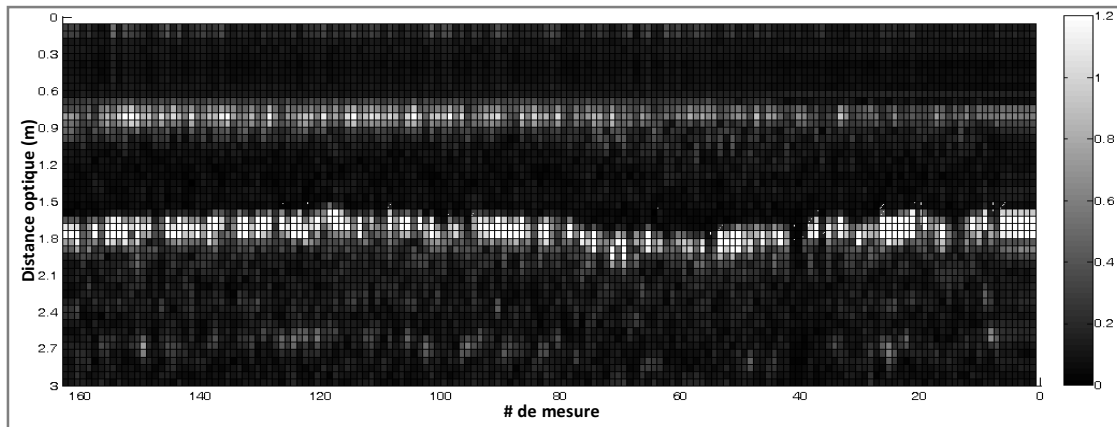


Figure 30 : Transect Memphrémagog sans neige (90 m)

Résultats des points fixes :

# Trou	Mesures manuelles		Exp Sans Neige		Exp Avec Neige		
	d neige (m)±0.01	d glace (m)±0.005	d glace Moy (m)	Ecart Type (m)	d neige Moy (m)	d glace Moy (m)	Ecart Type (m)
1	0.10	0.530	0.53	0.02		0.64	0.00
2	0.15	0.535	0.52	0.01	0.18	0.61	0.06
3	0.14	0.515	0.48	0.00	-	0.58	0.01
4	0.17	0.495	0.47	0.00	-	0.63	0.00
5	0.12	0.535	0.52	0.02	0.16	0.57	0.04
6	0.19	0.530	0.54	0.03	0.24	0.58	0.07
7	0.13	0.620	0.62	0.03	0.20	0.56	0.08
8	0.17	0.555	0.55	0.00	0.13	0.66	0.03
9	0.20	0.530	0.52	0.01	0.17	0.63	0.04
10	0.19	0.495	0.50	0.00	-	0.65	0.00

Tableau 4 : Résultats des points fixes, Memphrémagog

Le Tableau 4 montre dix points fixes où des mesures manuelles ont été comparées avec plusieurs mesures radars autour de chacun de ces points. Il démontre que pour les mesures sans neige une bonne précision est obtenue, mais pour les mesures avec la neige les valeurs sont différentes. La raison est que l'algorithme a de la difficulté à discerner la transition neige-glace, car la réflexion est beaucoup plus faible. Comme la neige passe d'un milieu non compact à un milieu de plus en plus compact avant d'arriver à la glace, cela forme une adaptation d'impédance où l'indice de réfraction croît graduellement au lieu de faire un changement brusque.

Le radar était monté sur un traîneau en plastique à environ 60 cm de hauteur et mesurait directement à travers celui-ci. La neige était dense et le poids du traîneau n'influait pas l'épaisseur de neige, mais les empreintes de pas de la personne qui tirait le traîneau pouvaient l'influencer. Il aurait fallu déporter le radar sur le côté ou pousser le traîneau par l'arrière. Les mesures manuelles ont été faites à la fin des transects en perçant la glace et en mesurant l'épaisseur de neige près du trou. L'incertitude sur la mesure de neige vient des variations possibles entre l'endroit de la mesure radar et celle manuelle. Celle sur l'épaisseur de glace vient du fait que la glace casse souvent en biseau à la fin du trou et peut influencer la

Patrick Pomerleau

09236230

mesure manuelle. Les écarts types des mesures radar proviennent des variations du calcul d'épaisseur de la glace parmi toutes les mesures effectuées au même point.

### 7.1.2. Rivière Châteauguay

Le 16 mars nous avons passé la journée avec deux employés de la compagnie Hydrométéo pour faire des tests sur des rivières près de Montréal. Voici un exemple d'un transect en largeur de la rivière Châteauguay.

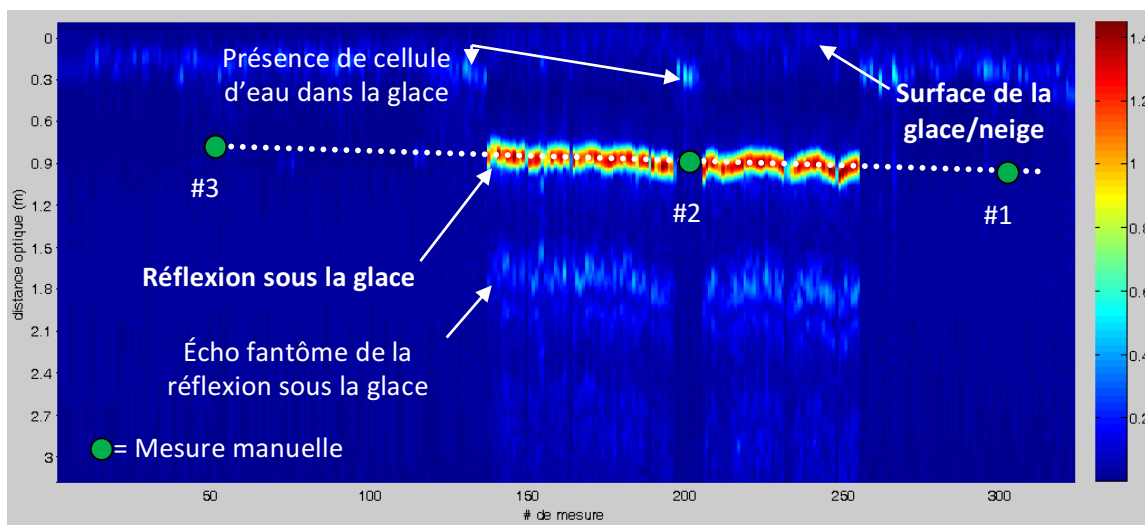


Figure 31 : Transect de la rivière Châteauguay

Le code de couleur représente l'intensité de l'écho retourné par un changement brusque d'indice de réfraction. En rouge est la réflexion intense de l'eau liquide sous la couche de glace, où la position varie entre 0.85-0.95 m optique. La surface de la glace génère aussi un écho d'amplitude moins élevée à environ 0.1 m. Nous pouvons estimer l'épaisseur de la glace par la différence de distance divisée par l'indice de réfraction de la glace qui est de 1.78, ce qui nous donne entre 0.42-0.48 m de glace. Les mesures manuelles nous donnent 0.48 m de glace total au centre, 0.40 m vers la mesure #50 et 0.53 m vers la mesure #300.

Les endroits où il y a absence de réflexion de l'eau sont les endroits où il y a de la neige humide ou des cellules d'eau dans la glace qui absorbent le signal. Malgré le fait que la présence d'eau en surface ou à l'intérieur de la glace gêne la mesure, il est possible de détecter ce phénomène par l'amplitude relative plus élevée que celle de la glace, mais moins élevée que l'eau en dessous. Avec cette information, le système pourrait ne pas tenir compte de ces profils pour calculer l'épaisseur de la glace et attendre les bonnes conditions pour continuer.

La Figure 32 montre plusieurs profils obtenus vis-à-vis le point de mesure #1, où se trouvait une lentille d'eau liquide de 1 cm d'épaisseur (rectangle bleu). Tandis que la Figure 33 démontre clairement le pic de l'eau sous la glace avec une amplitude beaucoup plus grande.

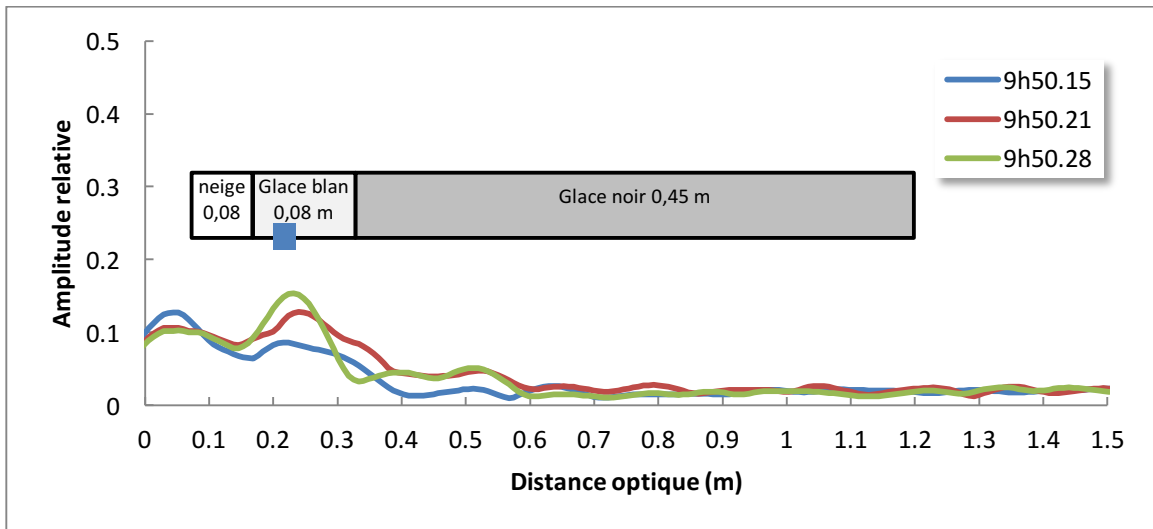


Figure 32 : Profil du premier point manuel qui montre la présence d'une lentille d'eau liquide prisonnière dans la glace

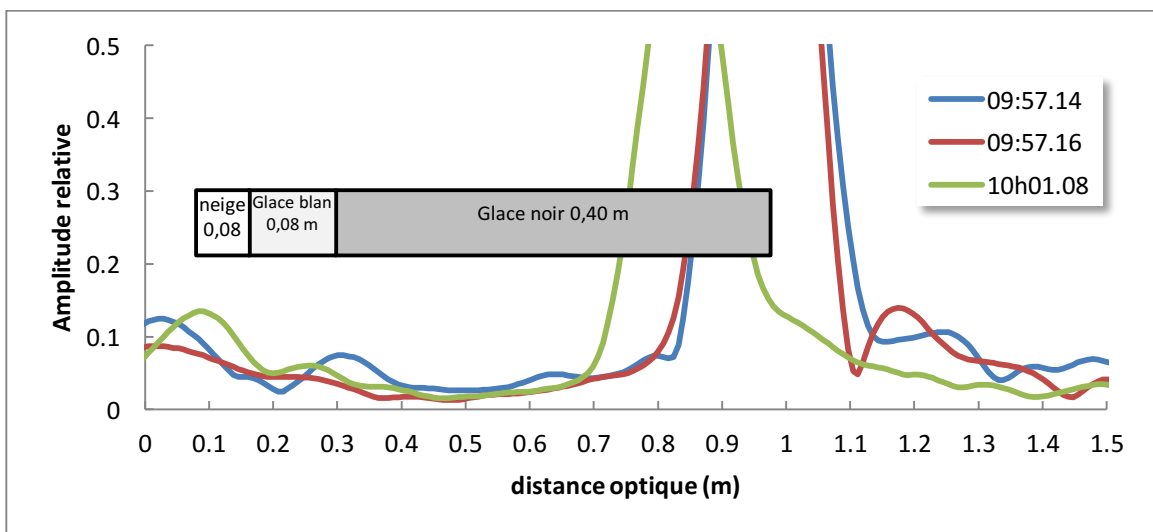


Figure 33 : Profil du deuxième point manuel de la rivière Châteauguay

### 7.1.3. Rivière Magog à partir du pont King, Sherbrooke

Cette expérimentation avait pour but de connaître la capacité du radar à mesurer l'épaisseur de glace à une distance qui équivaldrait à une installation fixe ou sur drone. La Figure 34 montre le profil alors que le radar était installé sur le pont de la rue King, au-dessus de la rivière Magog, à environ 5.5 m au-dessus de la glace sans neige. La figure montre que la glace est d'environ 9 cm, trop mince pour s'y aventurer à pied. Le petit pic de réflexion à 1.4 m provient d'une réflexion de la structure du pont. Il serait donc possible d'utiliser le système à partir d'un drone volant à faible altitude.

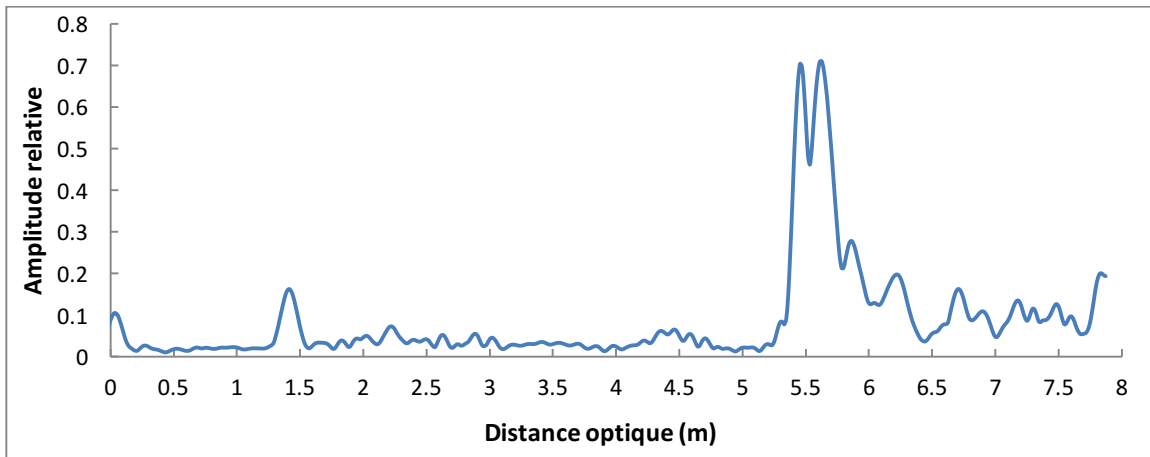


Figure 34 : Profil de la glace de la rivière Magog sous le pont de la rue King

## 7.2. Résultats du calcul automatique de l'épaisseur de glace

Comme les algorithmes de mesure automatique de la glace décrite à la section 4.6 n'ont été développés qu'à la fin de l'hiver et inspirés par l'apparence des profils obtenus durant les campagnes de terrain, ils n'ont pu être testés en temps réel que l'hiver suivant (2016). Par contre, le fait d'avoir enregistré toutes les données brutes nous a permis de faire des simulations et de raffiner les algorithmes même durant la période estivale. Voici les résultats obtenus lors des simulations.

### 7.2.1. Rivière Châteauguay et Acadie

Pour faire une simulation plus longue, nous avons mis bout à bout tous les transects effectués le 16 mars sur la rivière Châteauguay et Acadie. La figure suivante (Figure 35) montre graphiquement les résultats de la simulation.

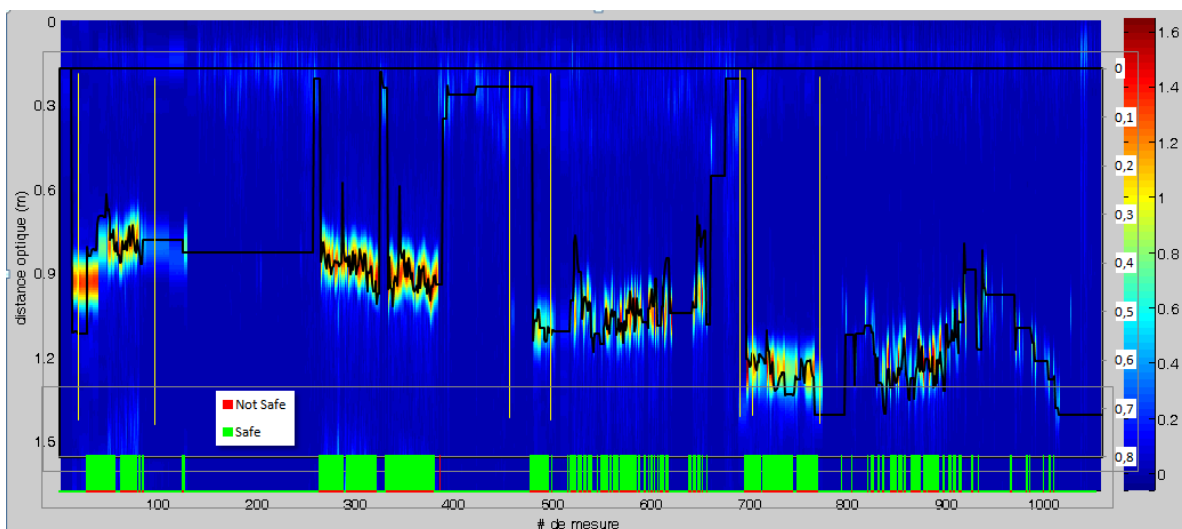


Figure 35 : Résultat de la simulation rivière Châteauguay et Acadie

Il est à noter que l'échelle à gauche est en distance optique et que celle à droite pour la ligne noire est en distance réelle en mètre. La première évaluation de l'épaisseur de la glace (à gauche) est surestimée parce que l'algorithme n'a pas détecté de pic assez élevé pour le dessus de la glace, alors il a utilisé 0 mètre

comme référence. Ce qui est facilement modifiable si la hauteur à laquelle le radar est installé est connue. Les barres verticales jaunes représentent l’emplacement des mesures manuelles (voir Tableau 5 plus bas). Les barres vertes et rouges dans le bas sont la représentation du jugement du programme à savoir si l’endroit est sécuritaire (vert, glace > 12 cm) ou non (rouge). Remarquez que le rouge ne s’allume que près de la mesure #400 et pour une très courte période, dû à la présence d’eau en surface de la glace. L’absence de vert ou de rouge signifie que le programme est en mode apprentissage et ne peut pas déterminer avec certitude le danger. Le Tableau 5 résume la comparaison entre les mesures manuelles et radar.

Mesures manuelles		Mesures Radar
Heure	Glace totale	Glace totale
	(m) $\pm$ 0,01	(m)
09:57	0,48	0,54 $\pm$ 0,01
10:02	0,40	0,37 $\pm$ 0,03
10:54*	0,52	0,04
11:20	0,56	0,54 $\pm$ 0,02
13:28*	0,68	0,02
13:49	0,535	0,60 $\pm$ 0,05
13:50	0,66	0,71 $\pm$ 0,01
Moyenne	0,548	0,552

Tableau 5 : Comparaison des mesures manuelles et simulées, rivière Châteauguay et Acadie. \*Les cas de 10h54 et 13h28, le programme ne peut pas calculer l’épaisseur, car absence de pic.

## 7.2.2. Lac Massawippi

Dans cette simulation, les mesures de #1 à #600 sont le transect du centre du lac vers la berge, puis ceux de #601 à #1200 représentent le transect de la berge vers le deuxième point de mesure sur le Lac.

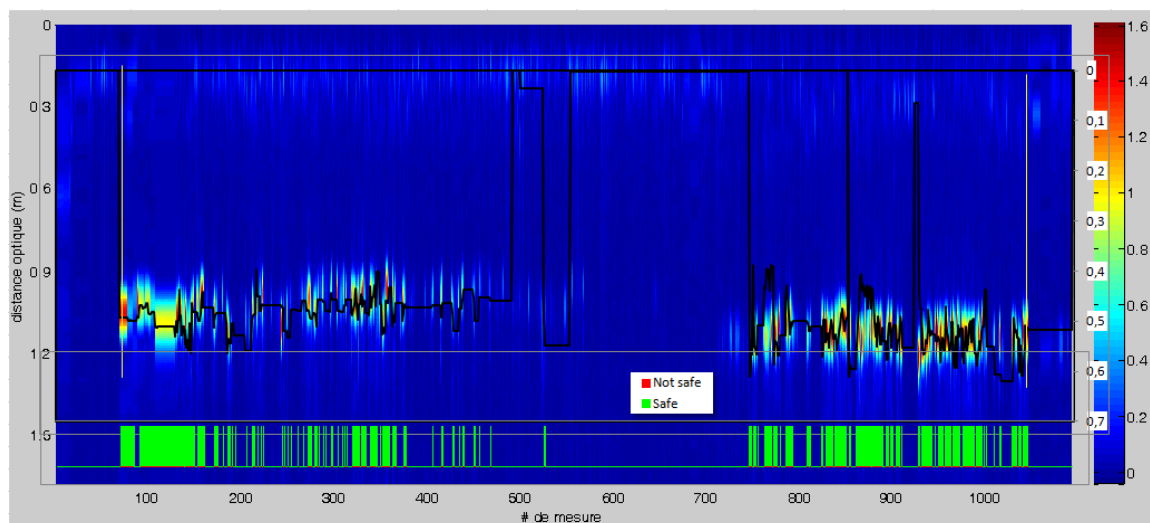


Figure 36 : Résultat de la simulation Lac Massawippi

Patrick Pomerleau

09236230



Mesures manuelles		Mesures Radar
Heure	Glace totale	Glace totale
	(m) $\pm$ 0,01	(m)
09:49	0,50	$0,50 \pm 0,01$
11:58	0,53	$0,54 \pm 0,04$

Tableau 6 : Comparaison des mesures manuelles et simulées du lac Massawippi

### 7.2.3. Lac Abitibi

Dans le cas du lac Abitibi, nous n'avions pas accès au traîneau que nous utilisons pour les autres endroits. Donc, au lieu de faire des transects sur de longues distances, le radar tournait autour de son trépied pour donner des profils circulaires de 40 cm de rayon. Au total, neuf points de mesure ont été enregistrés et mis bout à bout pour former le transect de la Figure 37.

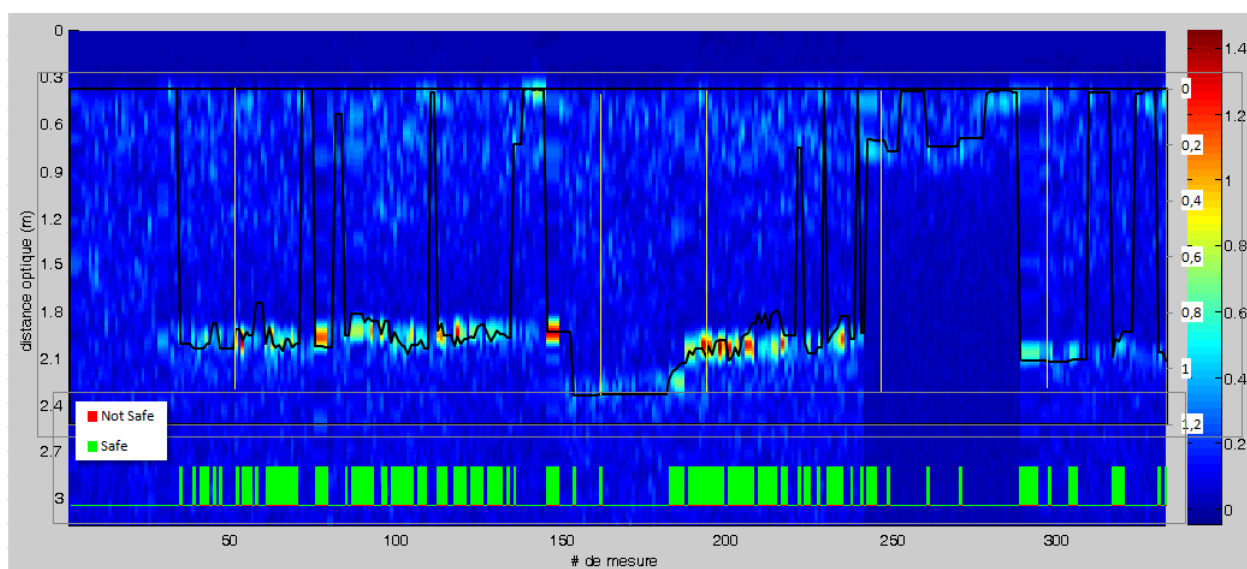


Figure 37 : Résultat de la simulation Lac Abitibi

Mesures manuelles		Mesures Radar
Heure	Glace totale	Glace totale
	(m)	(m)
10:40	> 0,76	$0,90 \pm 0,03$
11:12	$0,72 \pm 0,03$	$0,88 \pm 0,02$
12:00	$0,78 \pm 0,03$	$0,89 \pm 0,05$
12:53	0,08 (présence de lentille d'eau)	$0,13 \pm 0,09$
13:13	$0,83 \pm 0,03$	$0,90 \pm 0,03$

Tableau 7 : Comparaison des mesures manuelles et simulées du Lac Abitibi

#### 7.2.4. Lac Memphrémagog

Pour ce cas, comme nous avons enregistré des transects avec et sans neige, nous avons tenté d'améliorer le code en ajoutant une couche pour tenir compte de l'épaisseur de neige. Il a fallu adapter le code pour les données du lac Magog qui n'ont pas été prises avec les mêmes paramètres (padding de 1 et rampe de 4 ms). Les premiers tests n'étaient pas concluants puisque le code confondait trop souvent le dessus de la neige comme étant le dessus de la glace comme ceci :

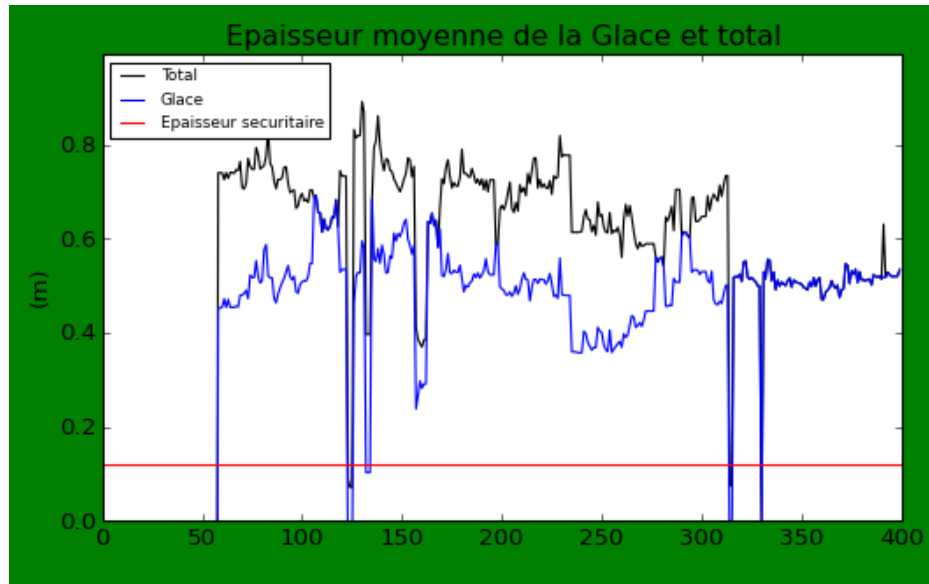


Figure 38 : Problème où l'algorithme confond le dessus de la neige avec le dessus de la glace. Axe vertical : épaisseur de la glace et neige, axe horizontal : numéro de la mesure.

Dans ce transect, les données #55 à #230 sont le transect avec neige et de #231 à #400 est le même parcours, mais sans neige. De plus il y a des trous dans les résultats.

Le problème est qu'au passage de neige => sans neige toutes les positions sont décalées uniformément vers le radar, parce que nous tenions compte de la position absolue des pics par rapport à celui-ci. Le pic du dessus de la glace est à l'ancienne position de la neige, il n'y a plus de pic vis-à-vis l'ancienne position de la glace (mais le programme le garde en mémoire) et le pic d'eau se rapproche du radar (ce qui donne un calcul de la glace plus mince) d'où l'importance d'opter pour une référence relative, comme le pic d'eau par exemple. La Figure 39 illustre ce concept.

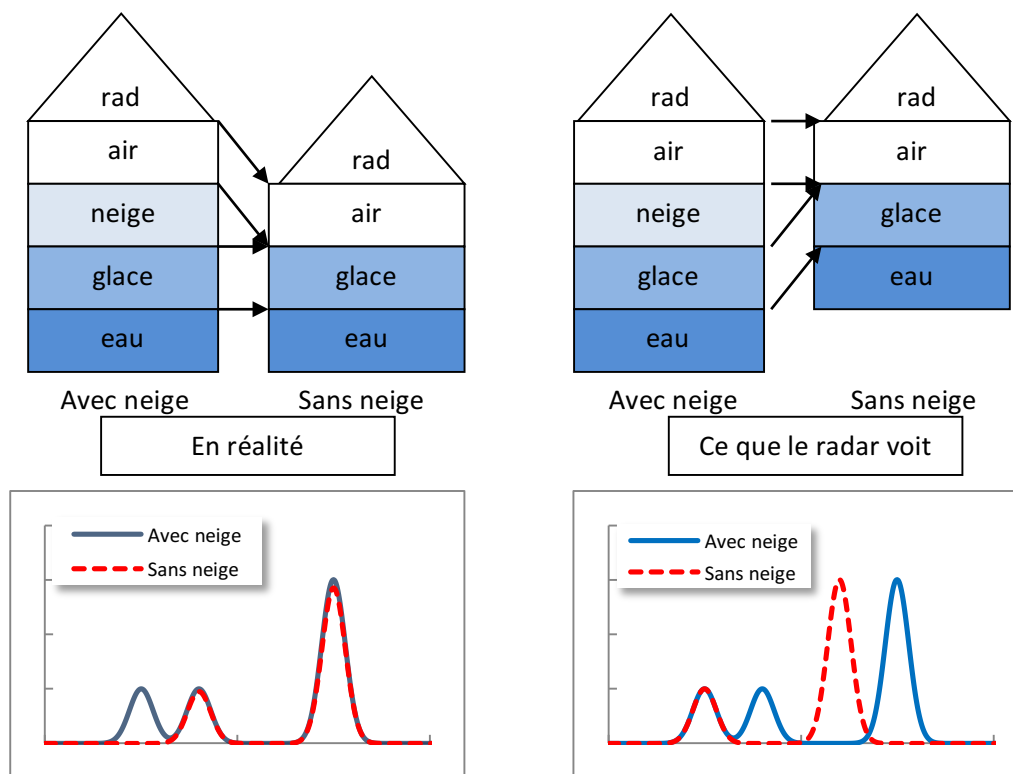


Figure 39 : Illustration du problème que l'algorithme confond le dessus de la glace avec le dessus de la neige

Nous avons donc changé la méthode en utilisant le pic de l'eau comme référence relative, mais il faut aussi qu'il soit capable de détecter lorsque la neige revient. Pour le tester, nous avons composé un nouveau transect fait de trois sections : avec neige, sans neige et avec neige encore. Le problème cette fois, est qu'une fois que le tracking a fusionné le pic de neige et de glace ensemble, il est difficile de les séparer de nouveau. Nous avons donc encore modifié le code pour y arriver en ajoutant la condition suivante : s'il y a au moins trois pics valides, le programme réattribue la position des différents pics à leur surface respective, comme décrit à la section 4.6. La Figure 40 illustre le résultat où de #0 à #175 est le transect avec neige, de #176 à #340 est le transect sans neige et de #341 à #400 est le même transect que de #0 à #60.

La figure démontre que l'algorithme est capable de détecter l'absence et le retour de la neige (après 10 profils et du moins pour cette série de données). Il est intéressant de remarquer la similitude de la courbe d'épaisseur de la glace entre #176 à #340 et celle entre #55 et #175, car ces deux sections représentent physiquement le même endroit, mais l'une avec de la neige en plus.

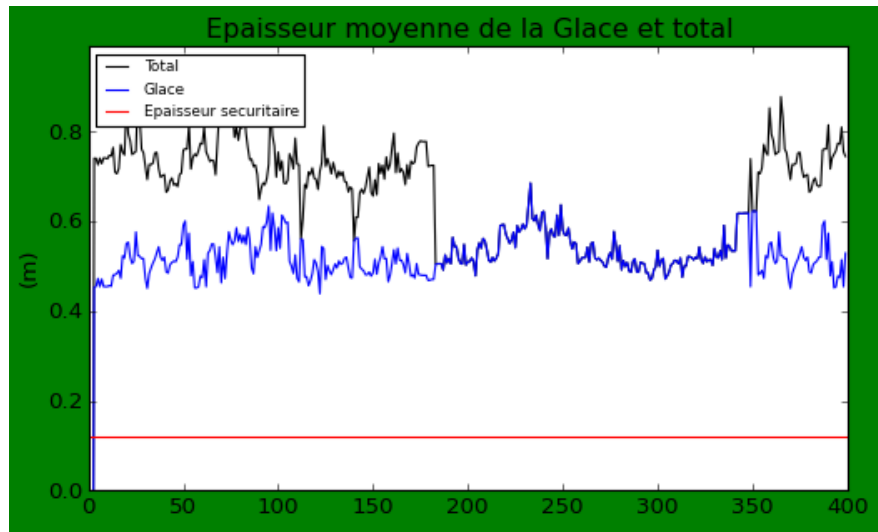


Figure 40 : Graphique illustrant la capacité de l'algorithme à discerner la présence et l'absence de neige.

Voici un aperçu du transect envoyé à la simulation pour le Lac Memphrémagog (Figure 41).

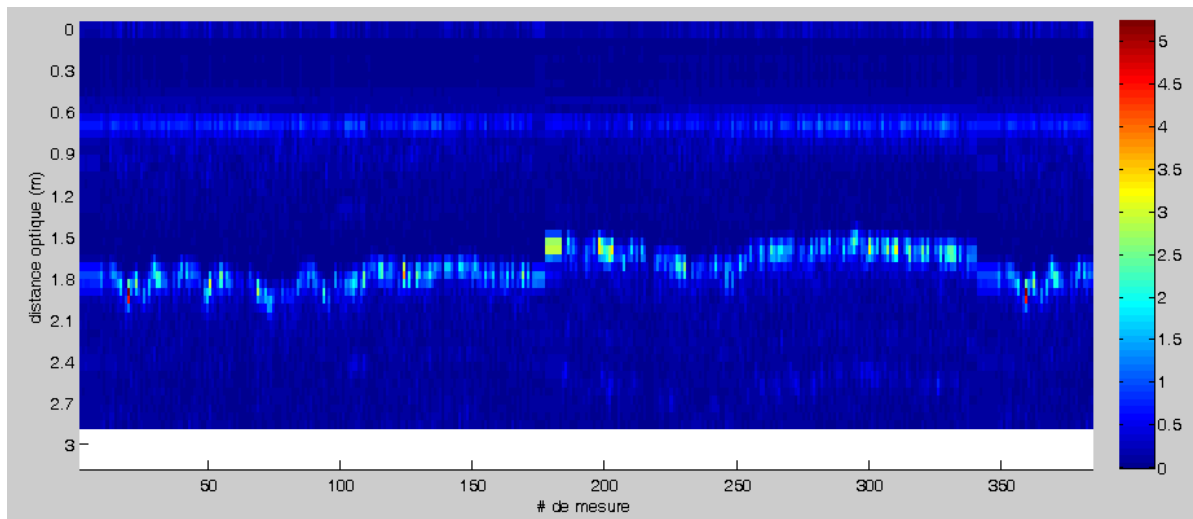


Figure 41 : Transect simulé du lac Memphrémagog combinant transect avec neige (#0-#175 et #341-#400) et sans neige (#176-#340).

Notez qu'il est difficile de discerner à l'œil la présence ou l'absence de neige entre la section 0-175 (avec neige) et la section 175-340 (sans neige). Cependant, le programme semble bien être capable de la discerner, comme le montre la figure suivante (Figure 42). Cette figure présente aussi la position approximative des points de mesure manuelle de l'épaisseur de glace et de neige.

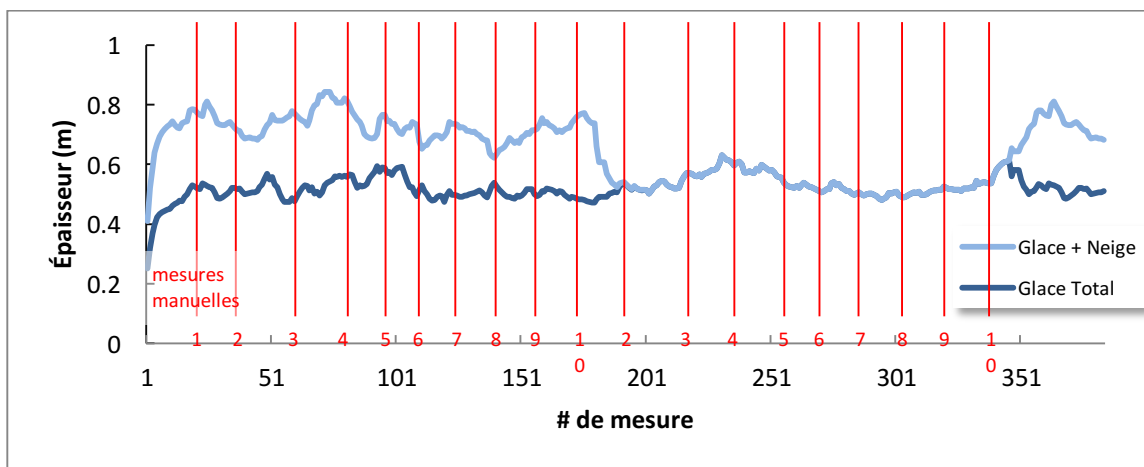


Figure 42 : Résultat de l'analyse automatique du transect du lac Memphrémagog.

# Trou	Mesures manuelles		Transect avec neige				sans neige	
	neige (m)±0.01	glace totale (m)±0.005	neige Moy (m)	Écart	glace Moy (m)	Écart	glace Moy (m)	Écart
1	0,10	0,530	0,20	0,10	0,47	-0,06	0,54	0,01
2	0,15	0,535	0,20	0,05	0,52	-0,02	0,52	-0,02
3	0,14	0,515	0,18	0,04	0,49	-0,03	0,50	-0,02
4	0,17	0,495	0,18	0,01	0,51	0,02	0,50	0,01
5	0,12	0,535	0,22	0,10	0,51	-0,03	0,51	-0,03
6	0,19	0,530	0,24	0,05	0,50	-0,03	0,53	0,00
7	0,13	0,620	0,12	-0,01	0,59	-0,03	0,61	-0,01
8	0,17	0,555	0,26	0,09	0,56	0,01	0,56	0,01
9	0,20	0,530	0,23	0,03	0,52	-0,01	0,52	-0,01
10	0,19	0,495	0,18	-0,01	0,51	0,02	0,49	-0,01

Tableau 8 : Comparaison des épaisseurs de glace et de neige mesurées de façon automatique avec les mesures manuelles du lac Memphrémagog.

Dans le Tableau 8, on constate que l'algorithme est capable de mesurer l'épaisseur de la glace avec une erreur moyenne de 2,6 cm avec de la neige et de 1,3 cm sans neige. Il a par contre davantage de difficultés à mesurer l'épaisseur de la neige avec une bonne précision (écart moyen de 4,9 cm). Il faut noter que l'emplacement des mesures manuelles est approximatif et que les valeurs calculées choisies, associées aux mesures manuelles, peuvent varier. Toutefois, l'erreur est à l'intérieur de 4 cm pour l'épaisseur de la glace.

### 7.2.5. Analyse des données de la rivière Châteauguay et Acadie avec le nouvel algorithme

Suite au succès de la nouvelle version de l'algorithme à discerner la présence de neige, nous avons testé les transects obtenus sur les rivières Châteauguay et Acadie avec cette nouvelle version. Toutefois, les résultats sont non concluants puisqu'il confond le pic du dessus de la glace et celui de la neige, ainsi que

celui qui pourrait être le pic de glace blanche/noire et le dessus de la glace total; et avec raison si l'on compare ces deux profils (Figure 43).

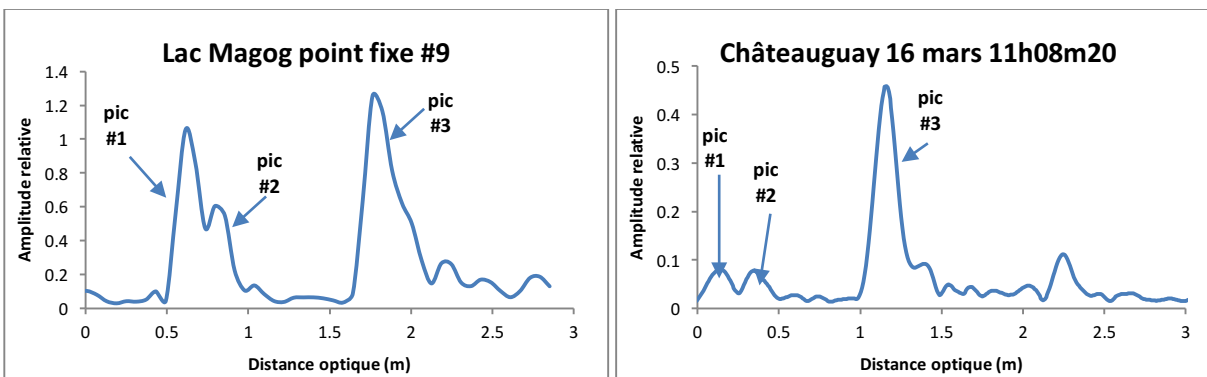


Figure 43 : Comparaison des principaux pics des profils du lac Memphrémagog et de la rivière Châteauguay.

Sur chaque graphique de la Figure 43 sont identifiés les trois pics principaux. Dans les deux cas, le programme associe le pic #1 au dessus de la neige, le #2 au dessus de la glace et le pic #3 au dessus de l'eau. Dans le graphique de gauche, les trois pics correspondent bien à la neige, la glace et l'eau. Par contre, dans le graphique de droite, le 3<sup>e</sup> correspond bien à l'eau, mais le premier pic correspond au-dessus de la glace et le 2<sup>e</sup> à l'interface glace noire-blanche. La description de l'emplacement lors des mesures manuelles est la seule façon de connaître la différence. Dans le cas d'une utilisation sur une motoneige, il est plus fiable de désactiver la couche de neige et toujours utiliser le premier pic comme dessus de la glace.

### 7.3.Synthèse des résultats

Après avoir passé en simulation toute la banque de mesures des différents lacs et rivières de différentes épaisseurs de glace et neige, nous avons pu raffiner l'algorithme de mesure automatique de la glace. Tous les profils enregistrés qui ont une mesure manuelle associée ont été réévalués en post analyse dans le programme python. La Figure 44 nous montre la compilation des résultats. Les mesures du Lac Abitibi sortent de la tendance, car la glace y était très épaisse et parsemée de cellules d'eau, ce qui induit en erreur le calcul automatique de l'épaisseur. Excluant ce cas extrême, la déviation est d'environ 2 cm avec un biais de -4 mm.

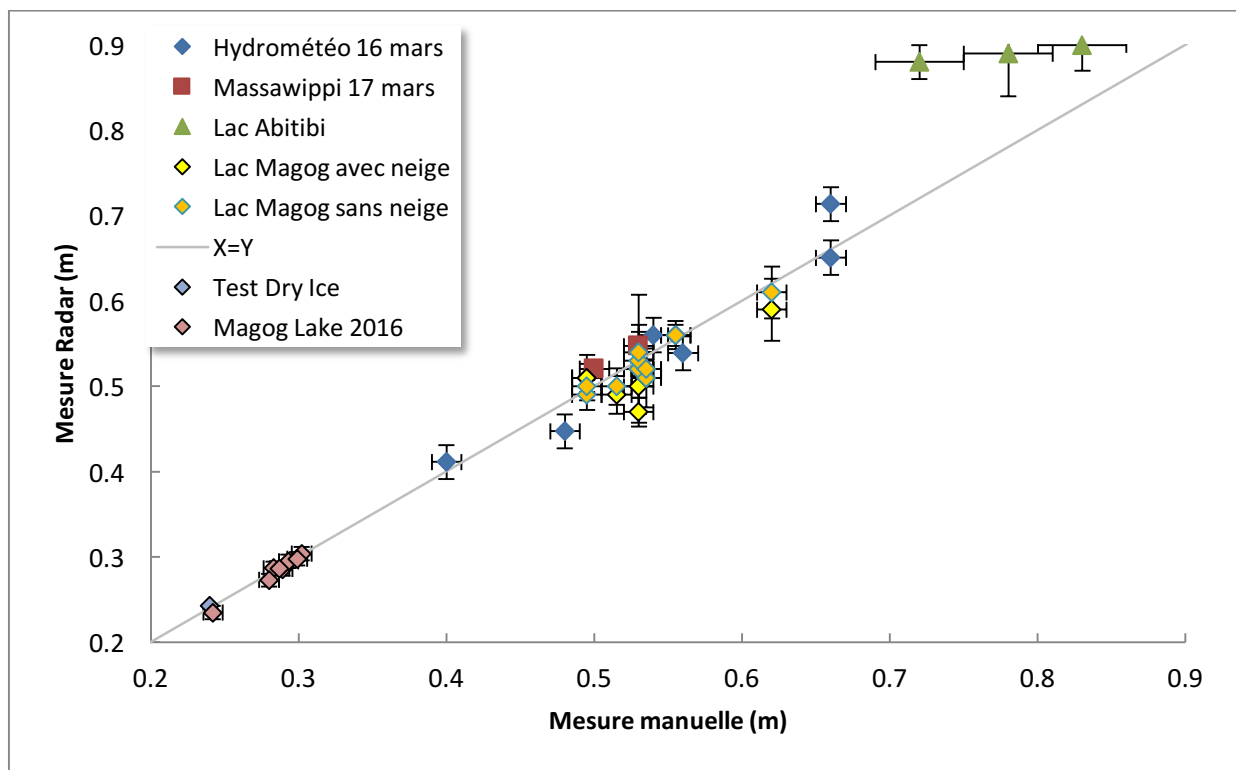


Figure 44 : Comparaison entre les mesures manuelles et automatiques de l'épaisseur de glace, campagnes terrain hiver 2015 et 2016

## 7.4. Discussion sur des tests supplémentaires effectués lors des campagnes sur le terrain

### 7.4.1. Glace blanche

La glace blanche, causée par le gel de la neige humide en surface de la glace, est moins solide et moins dense que la glace noire et doit donc avoir un indice de réfraction légèrement inférieur. Il est théoriquement possible de détecter ce changement par radar. Le prochain exemple d'écho radar (Figure 46), provenant de la rivière Châteauguay, montre la présence d'une bosse située à 0,3 m qui correspondrait à la transition entre les deux types de glace.

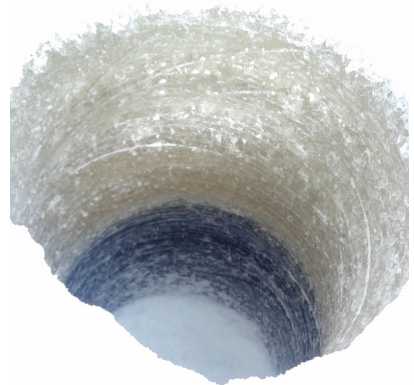


Figure 45 : Visualisation de la glace blanche et noire

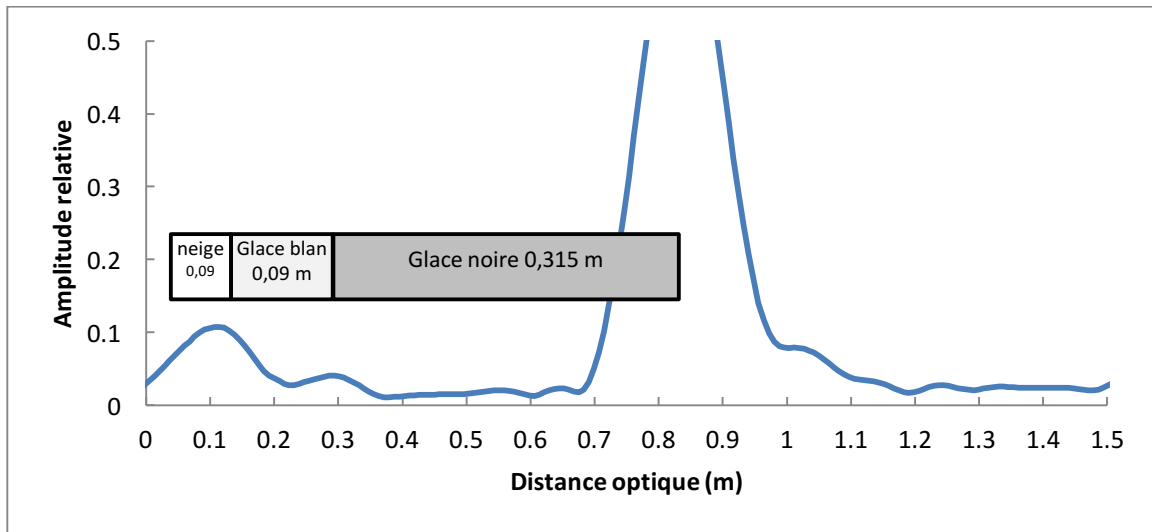


Figure 46 : Profil Radar du 3<sup>e</sup> point fixe de la rivière Châteauguay

Voici deux autres exemples sur le lac Memphrémagog. La Figure 47 présente deux profils différents du même endroit où l'emplacement supposé de la jonction glace blanche et glace noire est visible. Selon ces profils, nous aurions 30 cm de glace totale ( $\{0.73-0.192\}/1.78$ ) et 8.7 cm de glace blanche. Or, la mesure manuelle nous donne 29 cm et 10 cm pour l'épaisseur totale et la glace blanche. Sur la Figure 48 se trouve sept profils d'un autre endroit. Il est plus difficile de deviner les trois surfaces vis-à-vis les trois points de la courbe verte. L'épaisseur totale de la glace calculée est de 28.0 cm et celle de la glace blanche serait encore de 8.7 cm. La mesure manuelle nous donne respectivement 28 cm de glace totale et 9 cm de glace blanche.

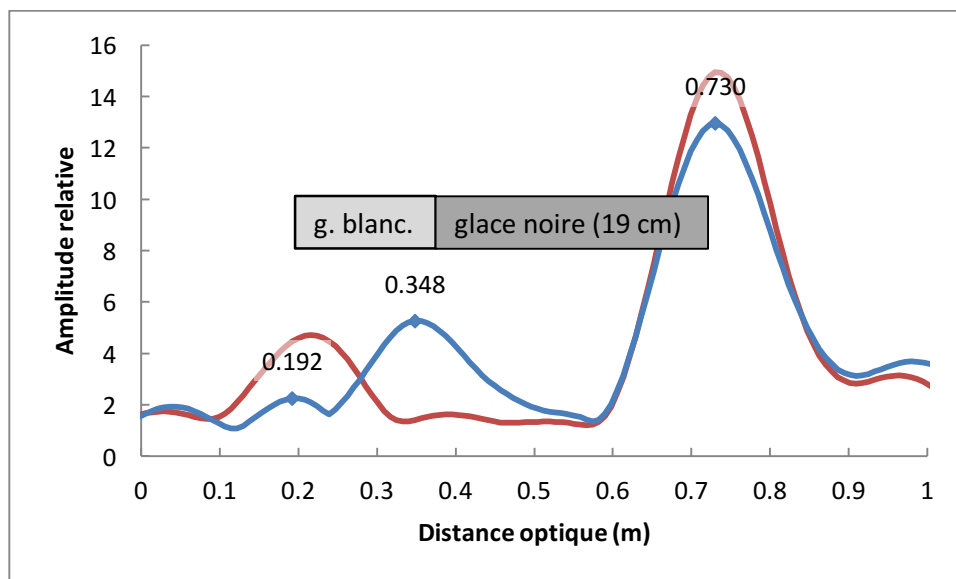


Figure 47 : Deux profils du même point (Memphrémagog, Pt#4). 29 cm de glace totale, 10 cm de glace blanche, 0 cm de neige.



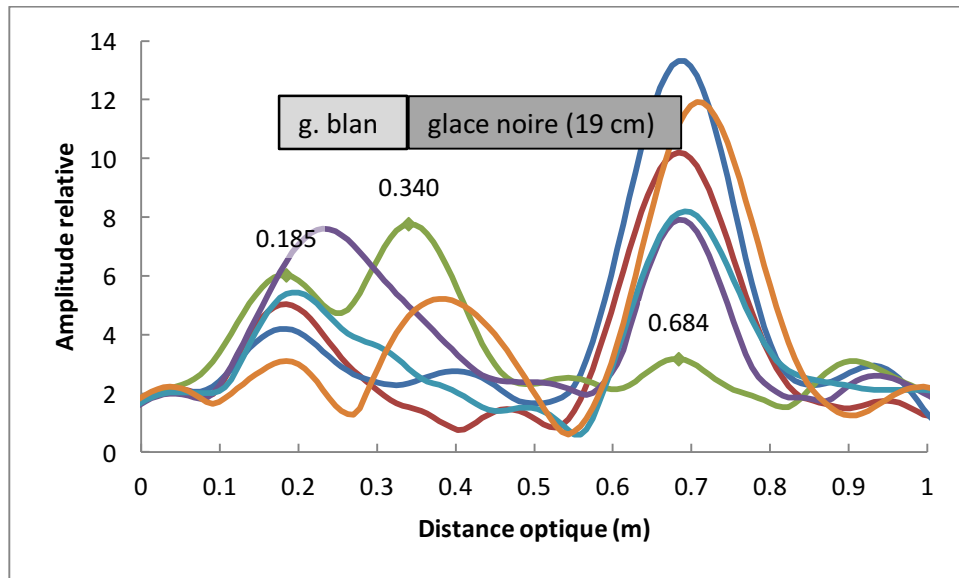


Figure 48 : Sept profils du même point (Memphrémagog, Pt#5). 28 cm de glace totale, 9 cm de glace blanche, 0 cm de neige.

Nous n'avons malheureusement pas de mesure manuelle de glace blanche. Faute d'information suffisante, il n'a pas été démontré avec certitude que nous pouvons mesurer cette glace blanche avec notre système, d'autres tests seront à prévoir. Cependant, si tel est le cas, ça serait une approche très novatrice dans le domaine, car il n'existe pas encore de système fiable capable d'y arriver.

#### 7.4.2. Glace humide sous neige mouillée

La première expérimentation avec de la neige humide est un test effectué sur l'étang en face du pavillon des Sc. humaines. Il y avait présence d'environ 1 cm de neige imbibée d'eau à la surface de la glace. La Figure 49 montre le profil et les deux réflexions associées à l'interface air-neige (~37 cm) et neige-eau (~60 cm), avec l'absence de celle de l'eau sous la glace.

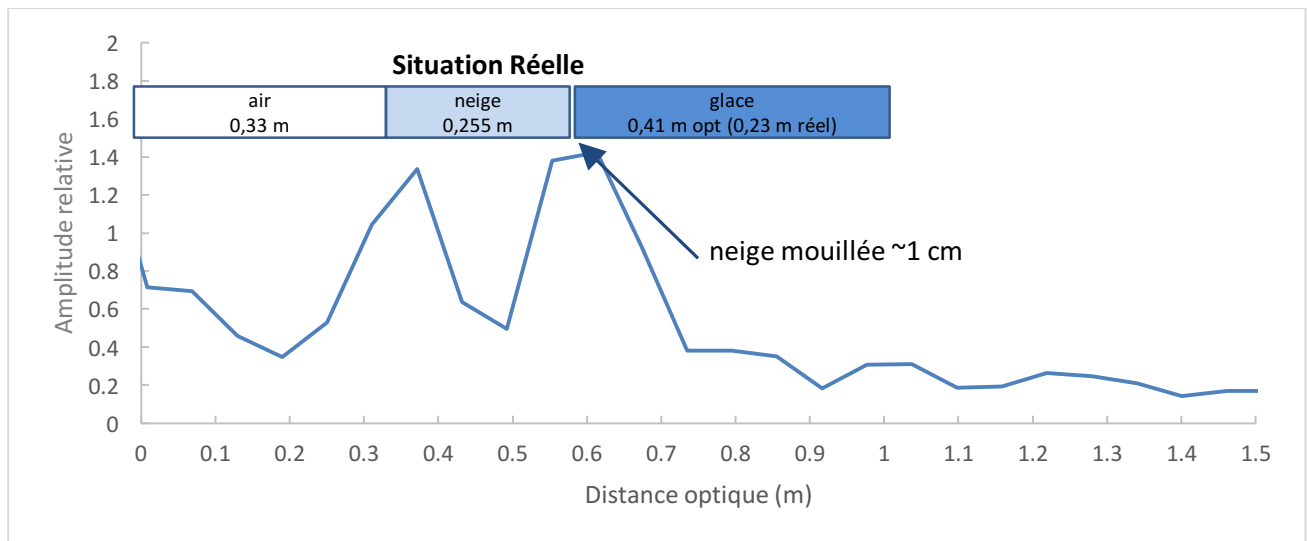


Figure 49 : Première mesure sur l'étang (1<sup>ère</sup> mesure).

D'autres mesures ont été faites après avoir enlevé la neige, mais comme la surface de la glace restait humide, il était impossible de mesurer l'épaisseur de la glace.

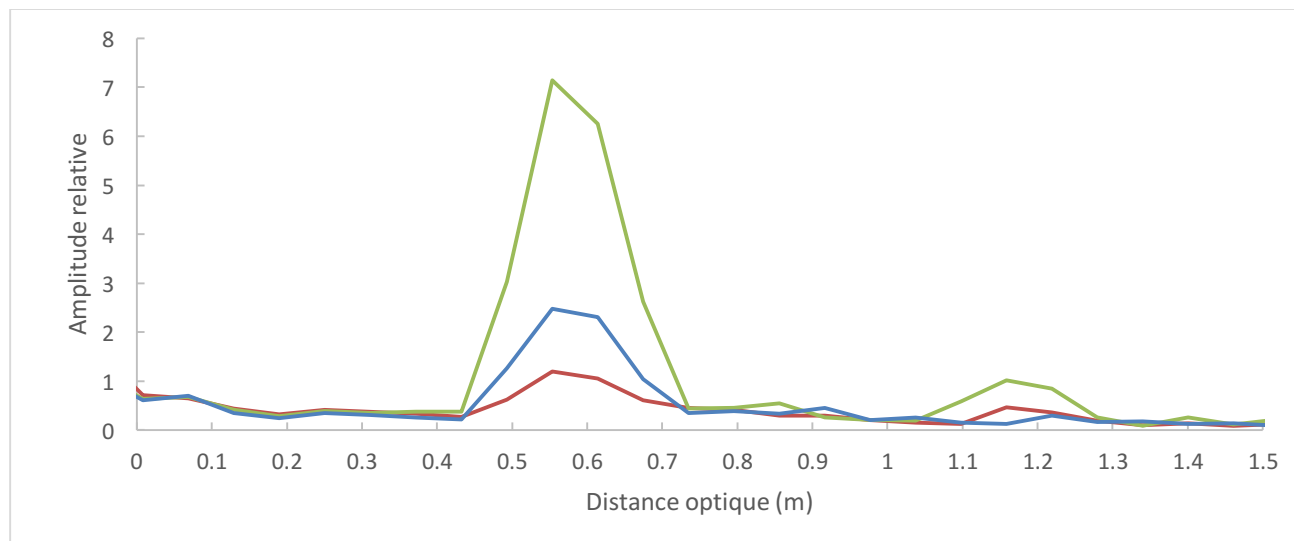


Figure 50 : Mesure sans neige sur l'étang mais avec humidité à la surface de la glace.

Le lendemain, comme la neige avait été enlevée, l'eau en surface a gelé durant la nuit (-15°C) et nous avons pu obtenir le profil de la Figure 51. La réflexion de l'eau sous la glace est finalement présente comme attendu. Selon ce profil, il y aurait 27.4 cm de glace réelle, tandis que la mesure manuelle de la veille avait donné 23 cm. Il se pourrait que le fait d'avoir enlevé la couche de neige isolante ait permis à la glace de s'épaissir davantage en dessous. Combinée à la précision de la mesure manuelle (~1 cm), cette mesure semble réaliste, mais à ce moment la perceuse à glace n'était pas disponible pour confirmer.

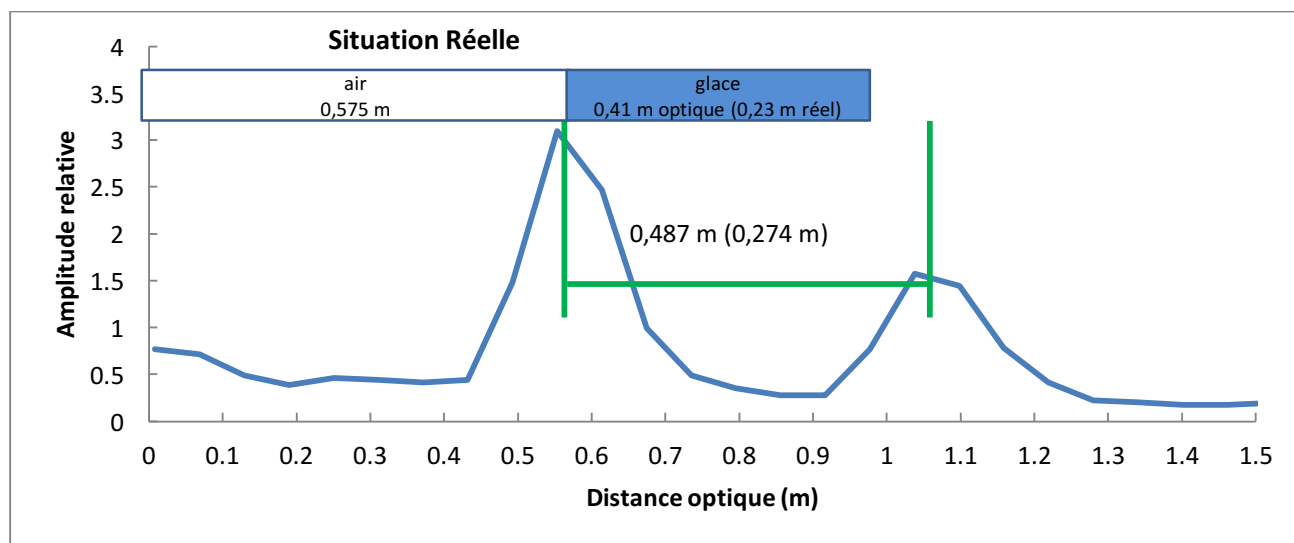


Figure 51 : Profil de l'étang à canards sans eau en surface.

### 7.4.3. Technique expérimentale pour éliminer l'humidité de surface

Comme mentionné dans la section 4.5.2, la présence d'eau liquide, même dans une très faible quantité, absorbe le signal jusqu'à rendre impossible la prise de mesure. Nous avons expérimenté une technique, utilisant de la glace sèche, pour contourner ce problème en gelant l'eau liquide directement à l'endroit de la mesure. La figure suivante (Figure 52) montre une photo (en haut à gauche) de la glace humide une fois la neige enlevée, puis une autre photo (en bas à gauche) montrant un bac de plastique protégeant la glace sèche du vent et conservant le froid au-dessus de la zone à mesurer. Le graphique de droite montre l'évolution du signal obtenu en fonction du temps d'exposition au froid. Il est possible de remarquer la très faible amplitude du pic d'eau sur la courbe bleue représentant le signal avant l'application de la glace sèche. Après 80 secondes d'application, le pic d'eau commence à apparaître et obtient sa pleine amplitude au bout de 200 secondes.

Il n'est pas possible d'utiliser cette technique pour une application mobile installée sur une motoneige, mais il est très pertinent de savoir que cette technique fonctionne pour mesurer l'épaisseur de la glace à des endroits précis.

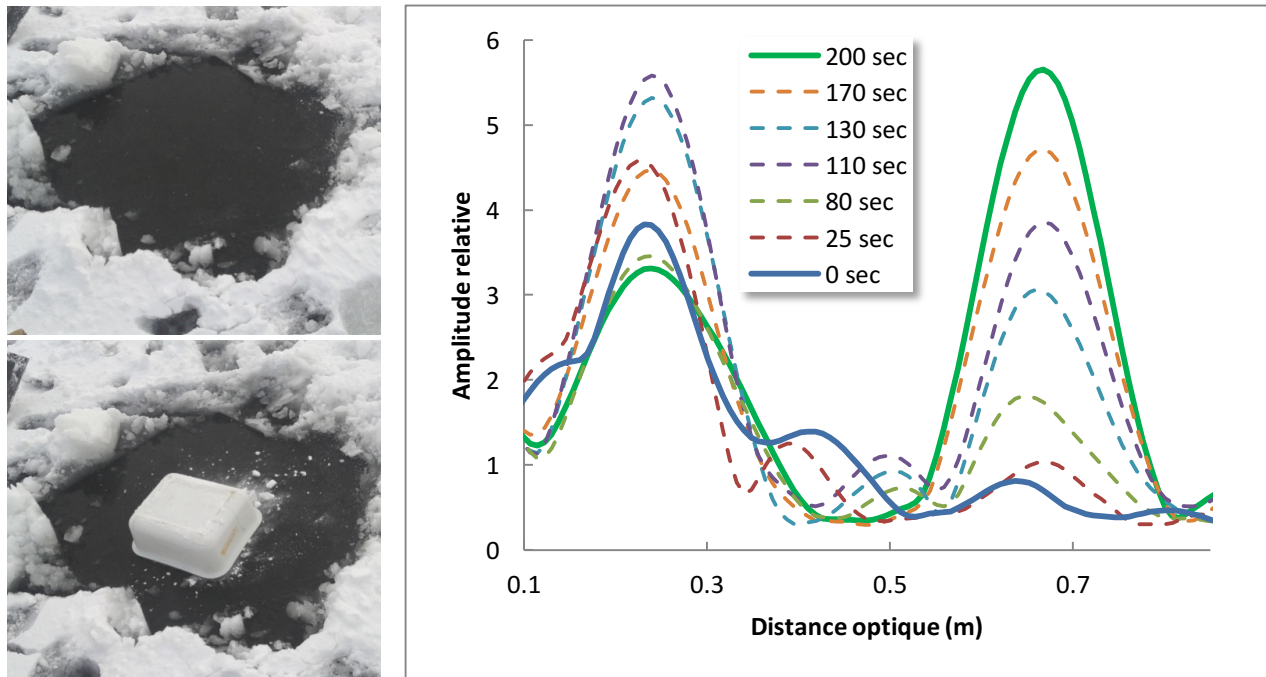


Figure 52 : Technique d'application de glace sèche contre le problème d'humidité en surface. Haut à gauche, présence d'humidité sous la surface de neige. Bas à gauche, application de la glace sèche sous un couvert protecteur. Droite, évolution temporelle des profils de lecture.

## 8. Conclusion pour la mesure de l'épaisseur de glace

Après avoir optimisé les spécifications des conditions des mesures radar, nous constatons qu'il est possible de mesurer de façon autonome l'épaisseur de la glace de lacs avec un radar FMCW avec une précision suffisante pour déterminer si elle est sécuritaire ou non. Des algorithmes utilisant la moyenne pondérée des valeurs permettent des mesures plus précises, mais la présence d'une couche mince de neige peut influencer la capacité à bien discerner la surface de la glace. La présence d'eau liquide dans la neige ou à l'intérieur de la glace aussi cause problème dû à son absorption. Si cette présence d'eau est localisée et sporadique, les algorithmes peuvent suspendre les mesures jusqu'à ce qu'il se trouve dans une zone plus propice aux mesures. La recherche effectuée dans le cadre de cette maîtrise démontre que le concept fonctionne et mériterait d'être approfondi par une entreprise privée dans le but de commercialiser le produit. Avec un tel système, des versions avec interface simplifiée pourraient être utilisées par tout type de personne, donnant une indication instantanée du potentiel de danger. Incorporé à des motoneiges ou VTT, il pourrait sauver des vies humaines. En station fixe ou installée sur un drone, il pourrait servir à des utilisations de recherche ou commerciales avec d'importantes retombées scientifiques et économiques.

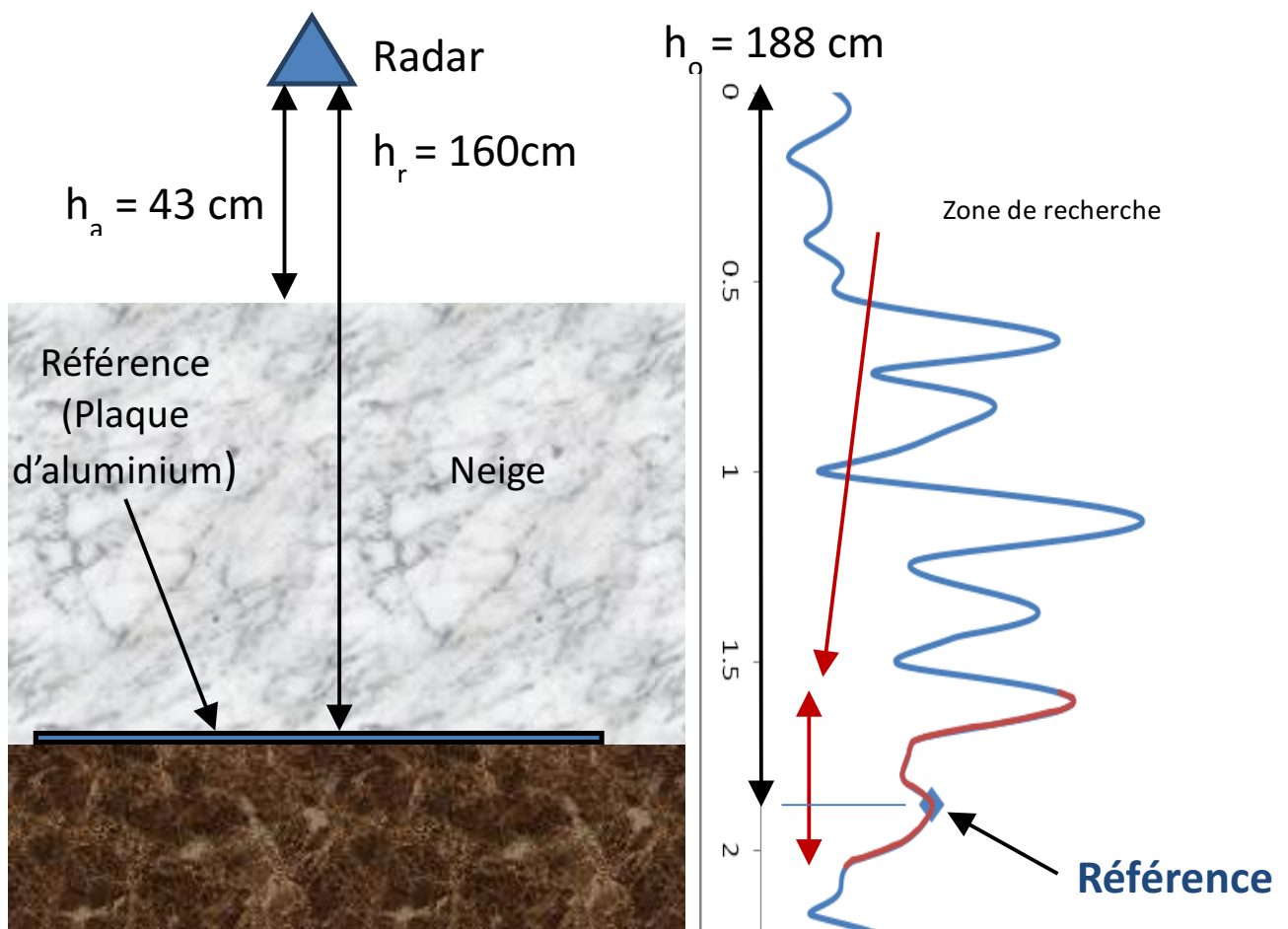
# Partie II, Expérimentations mesure de l'équivalent en eau de la neige (SWE)

## 9. Méthodologie pour la mesure de SWE

L'idée globale est de trouver l'indice de réfraction moyen de la neige qui module la propagation du rayonnement, puis de calculer la densité liée à cet indice et d'en déduire le SWE, connaissant son épaisseur. Pour trouver l'indice, il faut comparer le temps de parcours de l'onde dans la neige par rapport à l'air, ou de façon plus pratique, comparer l'épaisseur de neige réelle à celle perçue par le radar.

### 9.1. Montage

Voici le montage et un exemple de mesure réelle avec 117 cm de neige (l'axe vertical de droite est en distance optique) :



## 9.2. Protocole expérimental

1. Tout d'abord commencez à creuser à côté de l'endroit de la mesure pour insérer sous la neige, le plus près possible du sol, une plaque d'aluminium qui va servir de référence sur le profil radar. Comme l'amplitude de la réflexion du sol gelé est faible, il ne peut pas servir de référence. Par exemple, la plaque que nous avons utilisée lors de nos expérimentations était d'environ 50 x 50 cm et une épaisseur de 3 mm.
2. Installez le radar au-dessus de la surface de la neige, vis-à-vis la plaque de référence, avec un espace d'air d'au moins 20 cm, en faisant attention de ne pas déranger la neige à l'endroit de la mesure.
3. Mesurez avec le plus de précision possible la hauteur de la neige ( $h_n$ ) et celle du radar ( $h_r$ ) par rapport à la référence. À cette fin, une tige mince et graduée peut être insérée à la verticale dans la neige le plus près possible du radar.
4. Observez les profils radar pour tenter de distinguer le pic correspondant à la référence, il devrait se situer à environ  $1.3 \times h_r$ . Ajustez l'angle du radar au besoin pour avoir le pic le plus grand possible. Le pic est à son maximum lorsque le radar est parfaitement parallèle à la plaque. Dégagez le plus possible les outils métalliques qui pourraient être dans le champ de vision du radar.
5. Notez la nouvelle mesure de  $h_r$  si vous avez changé l'angle du radar.
6. Effectuez une mesure avec le radar (Snap shot sur l'application Androïde).

Pour en extraire l'indice de réfraction, nous procédons comme suit :

1. Calculez la distance entre le radar et la neige ( $h_a = h_r - h_n$ ).
2. Calculez la zone où le pic de référence devrait se trouver sur le profil radar. Comme l'indice de la neige varie entre 1.016 et 1.5 environ, la zone de recherche se situe<sup>5</sup> entre ( $h_a + h_n \times 1.016$ ) et ( $h_a + h_n \times 1.5$ ). Cette zone est représentée en rouge sur le schéma précédent.
3. Cherchez un pic qui se situe dans cette zone, en priorisant celui le plus près du centre s'il y en a plusieurs. La position de ce pic correspond à la position de la référence perçue par le radar ( $h_o$ ).
4. L'indice de réfraction moyenne de la neige peut être déduit avec cette relation :

$$n = \frac{h_o - h_a}{h_n} \quad \text{Éq. 9}$$

5. Utilisez ensuite l'équation 3 pour trouver la densité en  $\text{g/cm}^3$ . Pour le SWE, convertissez la densité en  $\text{g/cm}^3$  pour des  $\text{kg/m}^3$  ( $\text{g/cm}^3 \times 1000 = \text{kg/m}^3$ ) puis multipliez-le par la hauteur de neige ( $h_n$ ) en mètre, ce qui donne l'équivalent du SWE en mm.

---

<sup>5</sup> Il faut aussi prendre en considération que les données brutes du profil radar ont un biais de 11.18 cm sur leur position. Il faut donc ajouter ce biais à la zone de recherche et par la suite soustraire ce biais de la position du pic trouvé.

Pour mesurer le SWE manuellement pour comparer les mesures radars, nous avons utilisé deux méthodes différentes selon le site de mesure.

Dans la forêt de Montmorency, nous avons utilisé un carottier que nous enfoncions directement sous le radar et jusqu'à la plaque une fois la mesure terminée. Nous pesions ensuite le poids total de la neige contenue dans la carotte divisé par son volume.

Sur les autres sites, les emplacements étaient utilisés conjointement avec d'autres chercheurs, nous utilisions donc les données de densité prise par ces chercheurs à l'aide de couteau à neige tous les 5 cm sur toute la hauteur de neige.

### 9.3. Sites de recherche

Au total, quatre sites différents ont été sélectionnés:



Au site de la **forêt Montmorency**, on retrouve surtout de la neige de milieu forestier, d'une densité faible à moyenne.

À **Umiujaq**, les mesures ont été faites dans deux milieux très différents: neige de toundra soufflée (« wind slab ») et neige en milieu de forêt ouverte subarctique. Le manteau neigeux avait de nombreuses croûtes de glace et du givre de profondeur bien développé (gros grains peu cohésifs).

**Baie-James**: milieu forestier subarctique, avec croûtes de glace et givre de profondeur. Le manteau pouvait couvrir des arbustes.

**Cambridge Bay** : neige du type toundra soufflée sur un sol rocailleux, faible épaisseur, mais de forte densité. Quatre sites ont été échantillonnés dans des combes où la neige s'était accumulée (entre 0.8 et 1.5 m de neige). Présence de croûte de glace aussi.

Le Tableau 9 suivant résume les informations de chacun des sites.

Sites	Nombre de mesure	Type de neige	Épaisseur de neige moyenne (cm)	Densité moyenne de la neige $\text{kg/m}^3$
Umiujaq	21	Toundra mixte & forêt ouverte	78	301
Montmorency	8	Forêt Boréal	73	309
Baie James	10	Forêt ouverte, taïga	58	274
Cambridge Bay	22	Toundra	32	273
	4	Banc de neige soufflé	103	317

Tableau 9 : Description des sites étudiés et des conditions de neige moyenne

## 10. Résultats mesure de SWE

La Figure 53 montre la comparaison entre la densité de la neige calculée avec l'indice de réfraction obtenu avec le radar et celle mesurée sur le terrain, pour les quatre sites sélectionnés. Les mesures manuelles de densité au site de Montmorency ont été faites par extraction de carottes directement à l'emplacement de la mesure. Ceux des autres sites ont été faites par « snow pits » où chaque couche de 5 cm était échantillonnée avec un couteau à neige de 4 cm et intégrée de la référence jusqu'à la surface.

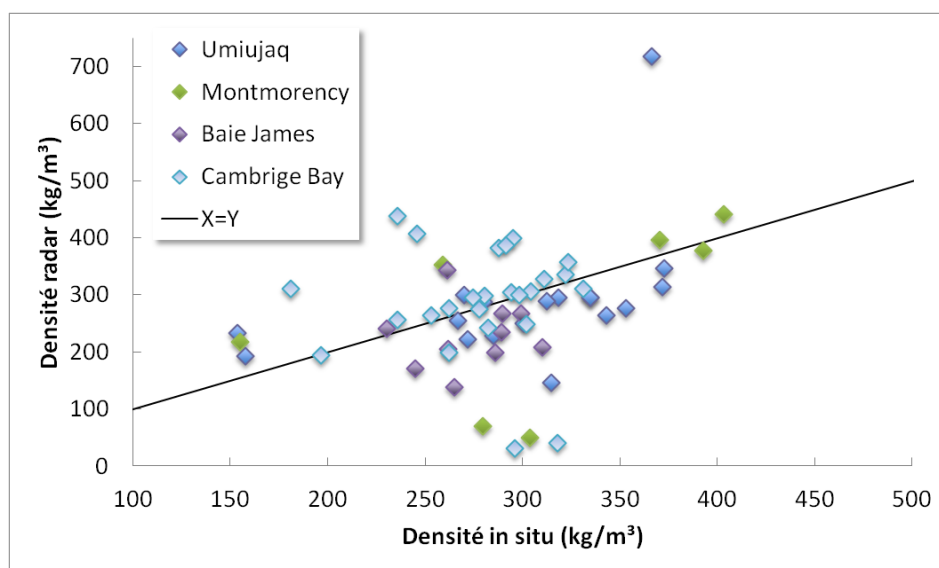


Figure 53 : Comparaison entre les densités mesurées grâce au radar et celles mesurées sur le terrain



Le graphique suivant (Figure 54) résume les résultats pour les SWE correspondant aux densités calculées précédemment en se basant sur la hauteur de neige mesurée sur le terrain. Les barres d'erreurs verticales sont calculées selon l'écart type de plusieurs mesures effectuées au même endroit et celles horizontales représentent  $\pm 5\%$  d'erreur sur la mesure manuelle.

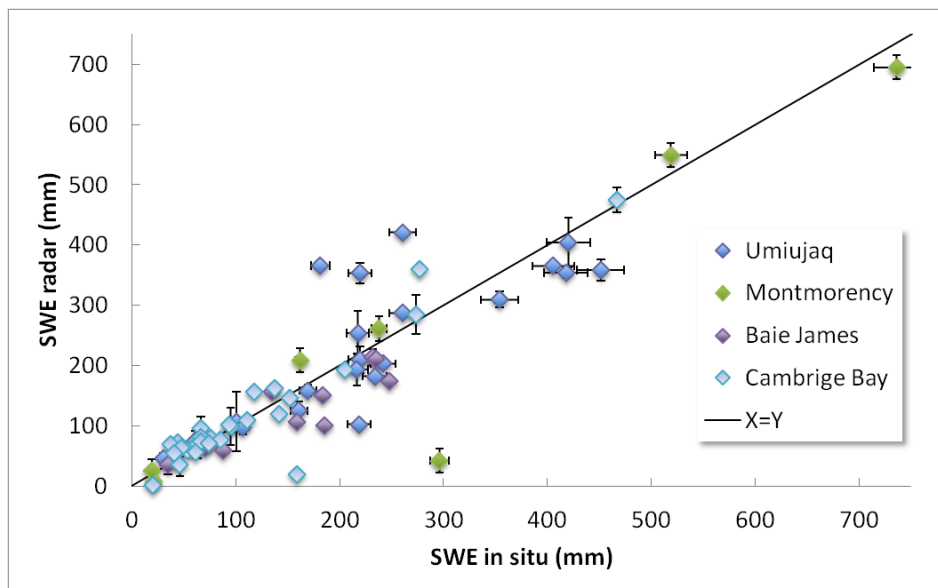


Figure 54 : Comparaison entre les mesures de SWE radar et celles prises manuellement pour les quatre sites

Dans les deux cas, l'erreur moyenne de toutes les mesures est d'environ 25% et la racine de l'erreur quadratique (RMSE) est de 59 mm pour le SWE et de 107 kg/m<sup>3</sup> pour la densité.

## 11. Analyse, mesure de SWE

Selon les résultats, l'objectif de 15% concernant l'erreur des mesures n'a pu être atteint. Voici quelques pistes qui pourraient expliquer pourquoi.

### 11.1. Précision du radar

Des manipulations précédentes où nous avons utilisé le radar pour mesurer l'épaisseur de la glace de lacs nous ont montré que sur un échantillonnage assez grand, l'erreur moyenne du radar se situait approximativement à  $\pm 2$  cm sur la mesure d'épaisseur de glace. Donc, il est raisonnable qu'une telle erreur puisse aussi survenir lors de la localisation du pic de référence. Dans le graphique suivant (Figure 55), la ligne pointillée montre l'erreur sur le SWE ou sur la densité que représente une erreur de 2 cm sur la position du pic de référence dans le profil radar. Cette simulation est pour une neige dont la densité moyenne est de 355 kg/m<sup>3</sup>. Notez que cette ligne peut aussi représenter une erreur de 2 cm sur la distance Radar-référence ou de l'épaisseur réelle de la neige. L'impact de cette erreur diminue rapidement avec l'épaisseur de la neige et à partir de 50 cm l'erreur maximale est inférieure à 15%. Or, ce n'est pas le cas pour plusieurs mesures. Il y a donc d'autres sources d'erreur que la précision du radar lui-même.

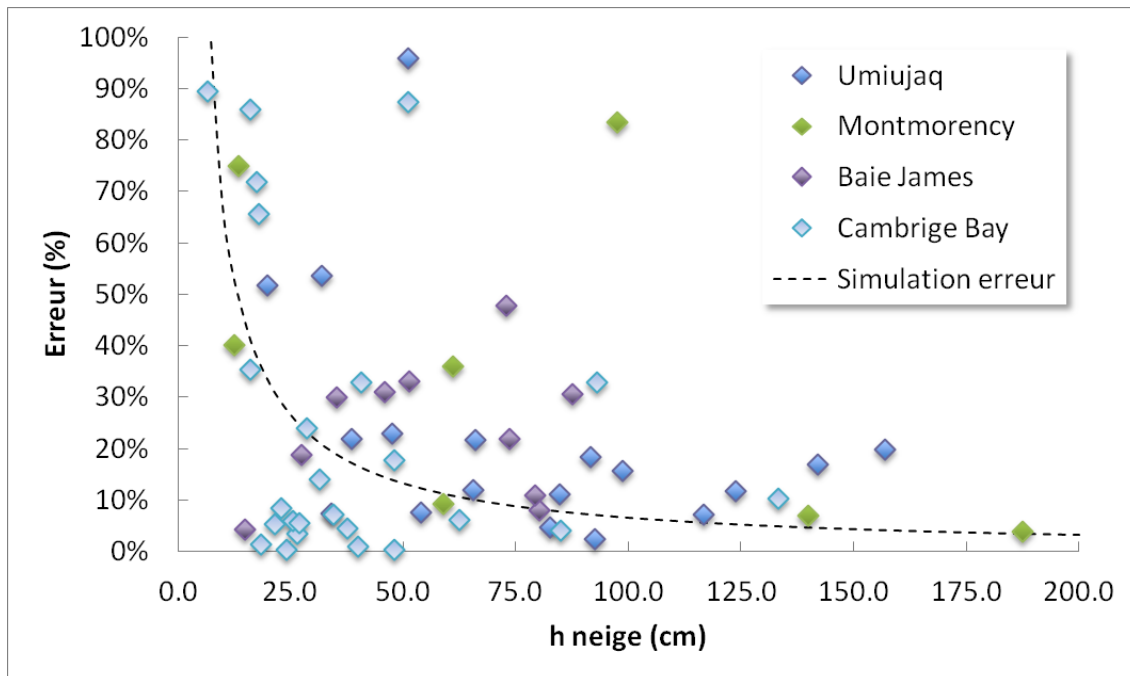


Figure 55 : Comparaison d'une erreur de mesure de 2 cm en fonction de la hauteur de neige

## 11.2. Fusion de pic

Si deux surfaces réfléchissant les micro-ondes sont disposées trop près l'une de l'autre, à moins de 12 cm dans notre cas, les deux pics fusionnent et ne forment qu'un seul pic, dont la position centrale dépend de l'amplitude relative de chacun. Ceci peut se produire si la référence a été placée près d'une couche de glace. Ces dernières ont une amplitude très importante sur les profils radars dû à leur grande surface par rapport à la référence.

Même si deux pics ne sont pas fusionnés complètement, la position du sommet peut être légèrement influencée par une fusion partielle. Voici un exemple concret (à gauche) où la trace de la référence est presque complètement perdue, éclipsée par la réflexion d'une couche de glace plus profonde. À droite, une simulation de deux fonctions gaussiennes d'amplitude différente et leur somme (fusion) en vert. Notez que le sommet de la première réflexion semble se déplacer vers le centre, passant de 1.56 m à 1.57 m. Ce phénomène pourrait facilement expliquer un décalage de 0.6 cm, exactement ce qu'il manque au profil de gauche pour avoir 100.8 mm de SWE comme la réalité, au lieu de 108 mm.

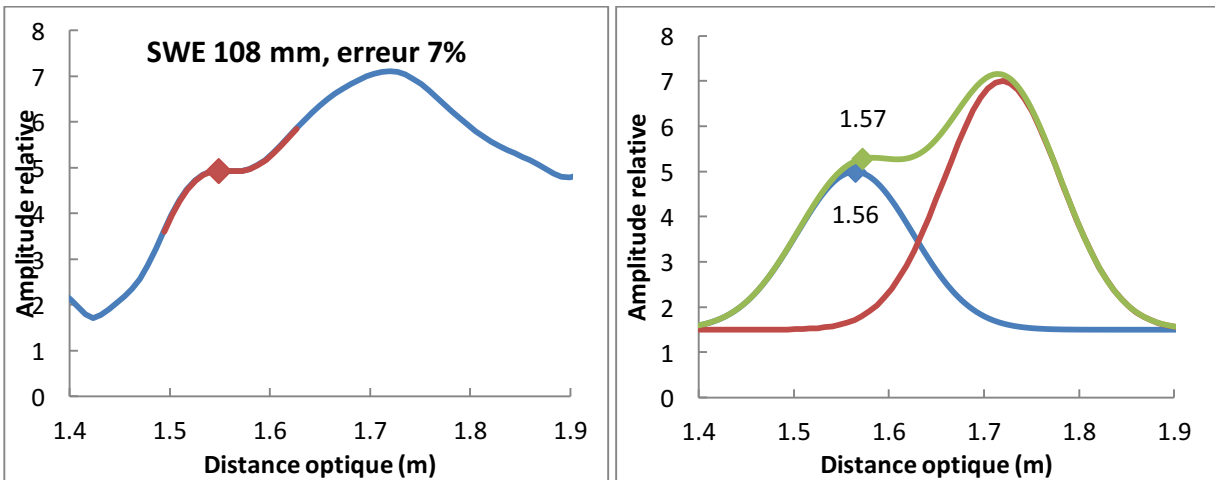


Figure 56 : Exemple de fusion de pic, Umiujaq SP#7, h neige 32 cm, 100.8 mm de SWE

Lorsqu'une fusion est complète, le déplacement du sommet du pic de référence peut être de 6 cm si les deux pics ont la même amplitude, mais jusqu'à un maximum de 12 cm si le pic « parasite » a une amplitude relative beaucoup plus grande. Sur la figure suivante, la ligne pleine montre ce que représente une erreur occasionnée par un déplacement de 6 cm, tandis que la ligne pointillée représente l'erreur maximale de 12 cm. 85% des points sont circonscrits sous la courbe pleine, puis 95% sont sous la courbe pointillée, ce qui fait que cette source d'erreur est peut-être la plus importante.

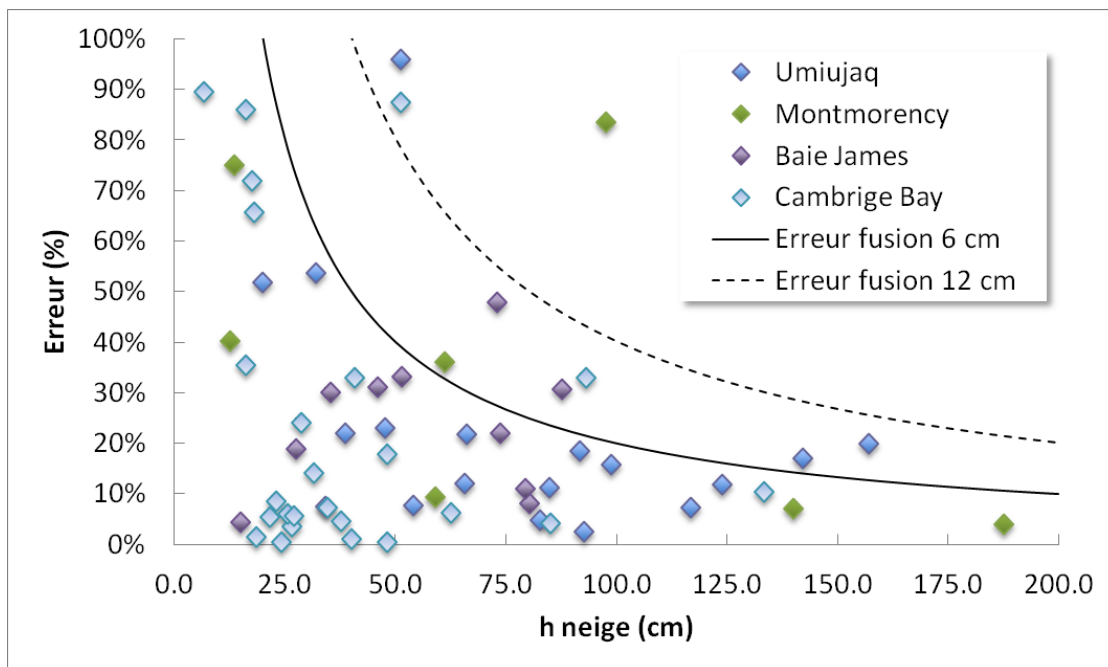


Figure 57 : Comparaison des erreurs de lecture avec l'erreur de fusionnement théorique de 6 cm et 12 cm

### 11.3. Choix du bon pic de référence

Il y a parfois plusieurs pics de même amplitude dans la zone de recherche. Il est alors difficile de déterminer lequel correspond à la référence. Le graphique suivant montre un profil du premier snow pit d'Umiujaq de 220 mm de SWE, où il y a trois pics possibles (160 cm, 172 cm et 185 cm) correspondant à

des SWE de 163 mm (erreur de 26%), 302 mm (erreur de 37%) et 459 mm (erreur de 109%). Il est à noter que la plaque de référence était installée très près d'une couche de glace.

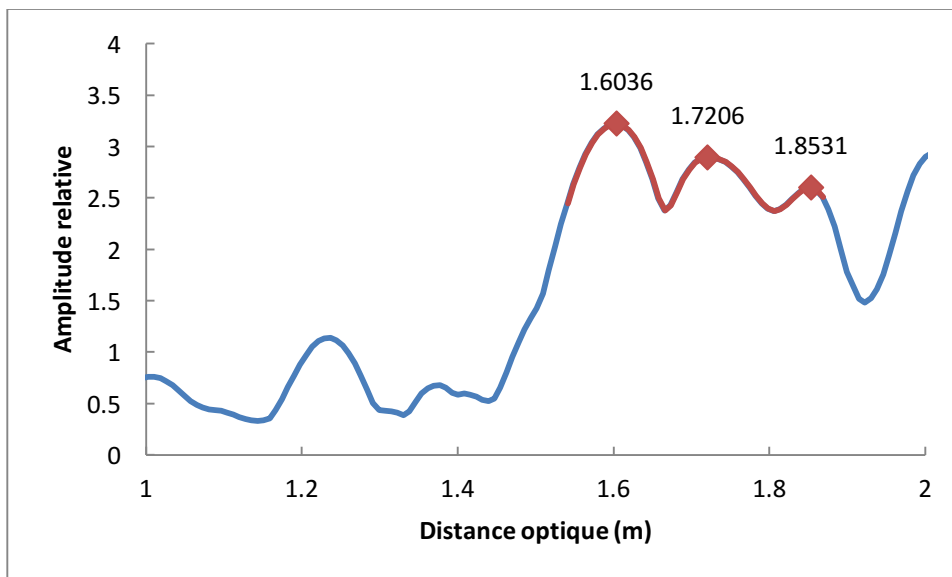


Figure 58 : Exemple où trois pics se trouvent dans la zone de recherche, lequel est le bon ?

#### 11.4. Alignement plaque-radar

Comme décrit à l'étape 4 de la méthodologie, le radar doit être parallèle à la plaque de référence pour que l'amplitude de sa réflexion soit la plus élevée possible. Malheureusement, il n'est pas toujours facile de positionner la plaque sous la neige de façon précise. Et même si nous avons fixé un niveau sur le dessus du radar, il est inutile de s'y fier si la plaque elle-même n'est pas au niveau. Voici un exemple réel avec deux profils du même snow pit, mais avec le radar positionné à des angles très légèrement différents ( $\pm 5^\circ$ ). Le premier pic à 1.2 m reste sensiblement au même endroit, mais il y a beaucoup de variations dans la zone de recherche (en rouge), si bien que la trace de la référence dans le deuxième profil est perdue.

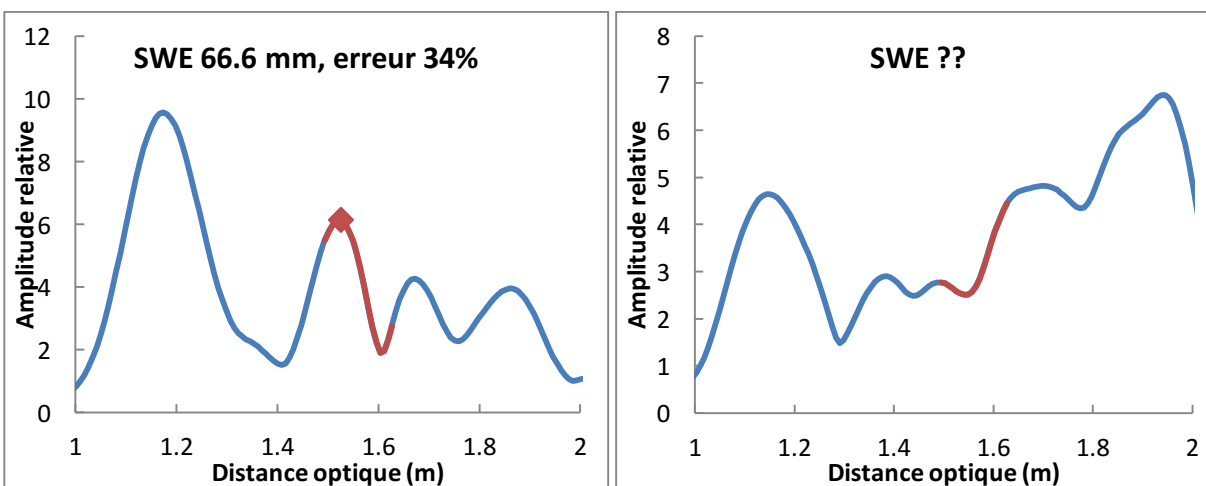


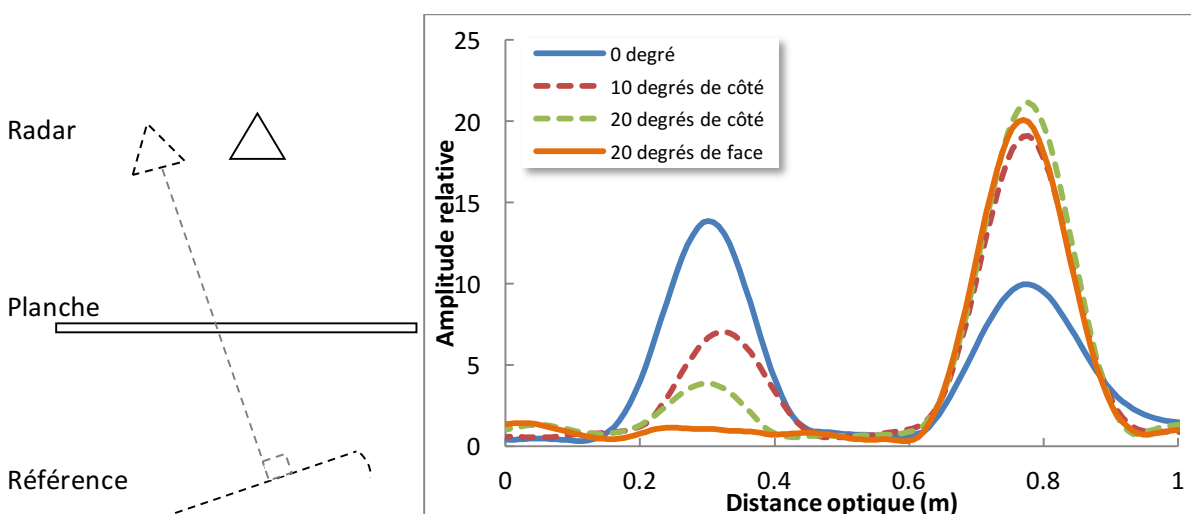
Figure 59 : Comparaison de deux profils avec un angle radar légèrement différent ( $\pm 5^\circ$ ). Umiujaq SP#7, 100.8 mm de SWE

## 12. Améliorations futures

Parmi les sources d'erreur mentionnées plus haut, plusieurs pourraient être minimisées ou corrigées. Par exemple, les erreurs associées à la hauteur du radar par rapport à la référence et l'alignement radar-référence pourraient être éliminées avec un montage fixe où la hauteur du radar et son alignement sont connus.

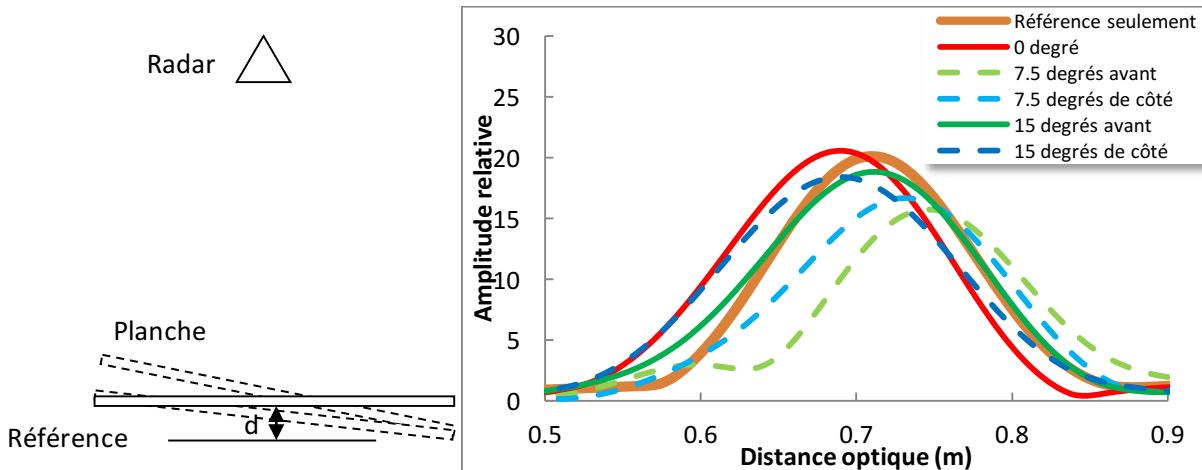
Pour les erreurs où il y a plusieurs pics dans la zone de recherche, une installation fixe pourrait aussi faire la différence si l'amplitude de la référence est maximisée avec l'emploi d'une plus grande plaque d'aluminium, nous permettant ainsi de mieux la distinguer.

La fusion des pics par contre reste difficile à corriger. Cependant, il y a une astuce qui pourrait fonctionner. Comme les pics associés aux couches de glace et à la référence sont lus grâce aux réflexions spéculaires, il serait possible d'éliminer les réflexions de la glace en changeant l'angle de visé du radar et de la référence. En ayant un angle assez prononcé, la réflexion spéculaire de la glace sera dirigée du côté opposé à celle du radar. Pour démontrer ce point de vue, voici des tests effectués avec une planche de bois faisant office de couche de glace :



Des tests d'inclinaison de face et de côté ont été faits puisque le radar n'a pas une sensibilité isotrope, ayant un faisceau beaucoup plus large de côté que de face (voir Patron d'émission du radar en annexe). Le graphique ci-haut montre que l'amplitude de la planche (située à 30 cm) diminue au fur et à mesure que l'angle augmente, au profit de la référence (située à 75 cm). Il est plus efficace d'incliner le radar de face plutôt que de côté pour le même angle de 20°.

Maintenant, nous savons que nous pouvons diminuer les réflexions spéculaires en inclinant le radar, mais est-ce suffisant pour rétablir la bonne position centrale de deux pics fusionnés ? Voici un deuxième montage et ses résultats pour clarifier ce point. Le radar était situé à 71 cm de la référence et la distance entre le centre de la planche et la référence (d) était de 5.4 cm lorsqu'à l'horizontale, de 3.7 cm à 7.5° et à 8 cm à 15° (figure ci-dessous).



La courbe orange correspond à la position idéale, obtenue en n'ayant aucune planche par-dessus la référence. Lorsque la planche est ajoutée à l'horizontale au-dessus de la référence, le pic fusionné (en rouge) se déplace vers la gauche de 2.34 cm. Étrangement, lorsque la planche est inclinée à 7.5°, le pic de fusion est plus loin que la référence, mais lorsque la planche est inclinée davantage (à 15°), le pic de fusion revient vers l'avant. Comme le faisceau du radar est plus large sur les côtés, il se peut que le radar capte une réflexion provenant du bout de la planche ce qui influence beaucoup la position du pic fusionné (courbe bleu foncé). Toutefois, lorsque la planche est inclinée de 15° vers l'avant (courbe vert foncé), la réflexion de la planche est si faible qu'elle n'influence plus la position du pic fusionné et nous retrouvons la même position originale, lorsque la planche était absente. Il est donc raisonnable de penser que nous pouvons minimiser les réflexions des couches de glace avec cette idée et qu'il est préférable d'incliner le radar vers l'avant plutôt que sur le côté.

### 13. L'installation "idéale"

À la lumière de ces expériences, voici le montage proposé pour une station fixe, avec le radar incliné de 20° vers l'avant. La distance radar-référence serait de 3 m pour atteindre la limite de la plage de 4 m s'il y a de la neige du sol jusqu'au radar avec un indice de la neige de 1.33, ce qui ferait un SWE d'environ 850 mm. L'angle de réfraction dans la neige peut varier de quelques degrés suite au changement d'indice, passant de 20° à 15° si l'indice de la neige est de 1.33 (loi de Snells-Descartes)

La mesure de la densité dépend de la distance parcourue, la distance dépend de l'angle et cette dernière dépend de la densité. Pour déterminer la densité avec le plus de précision possible, il faut déterminer la densité avec une boucle d'itération successive. D'abord, l'angle est fixé à 20° pour déterminer l'indice de réfraction (Éq. 9). Ensuite, l'angle est recalculé avec le nouvel indice et le programme recommence jusqu'à un nombre fixe d'itérations ou jusqu'à ce que l'indice ne varie que très faiblement. Une fois l'indice et l'angle trouvés, il est ensuite facile d'obtenir la densité et le SWE.

La plaque de référence serait faite d'une feuille d'aluminium de 3 mm d'épaisseur et serait d'une dimension de 60 x 120 cm, ce qui correspond respectivement à des angles de 11° et 22° sur le patron de rayonnement. La plaque de référence serait elle aussi à un angle de 20° et la partie hors terre aurait une

hauteur d'environ 20 cm. Le tout sera monté sur un cadre rigide pour conserver l'alignement avec le temps et le gel-dégel et qui peut être en métal puisque le rayonnement n'est pas pointé dans sa direction. La boîte de contrôle peut être installée sur le mât pour un accès plus facile. Un capteur à ultrason comme le SR50 de Campbell pourra mesurer la hauteur de neige pour remplacer la mesure manuelle. Ce type de capteur a une précision de  $\pm 1$  cm, ce qui représente une erreur de 9% pour une hauteur de 35 cm de neige ou moins de 5% à partir de 65 cm de neige.

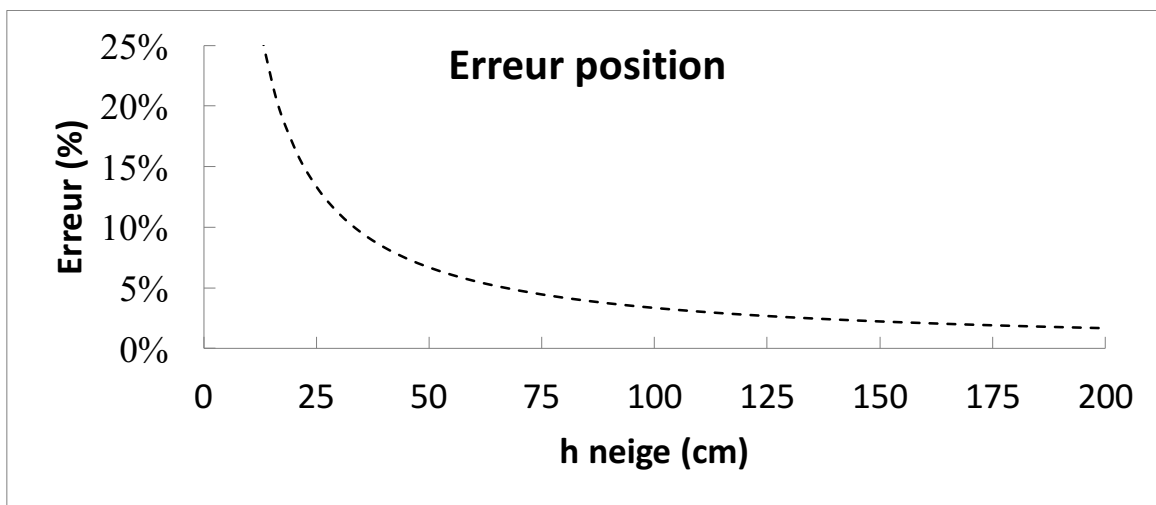


Figure 60 : Erreur relative attendue avec un capteur à ultra-son pour la mesure de la hauteur de neige

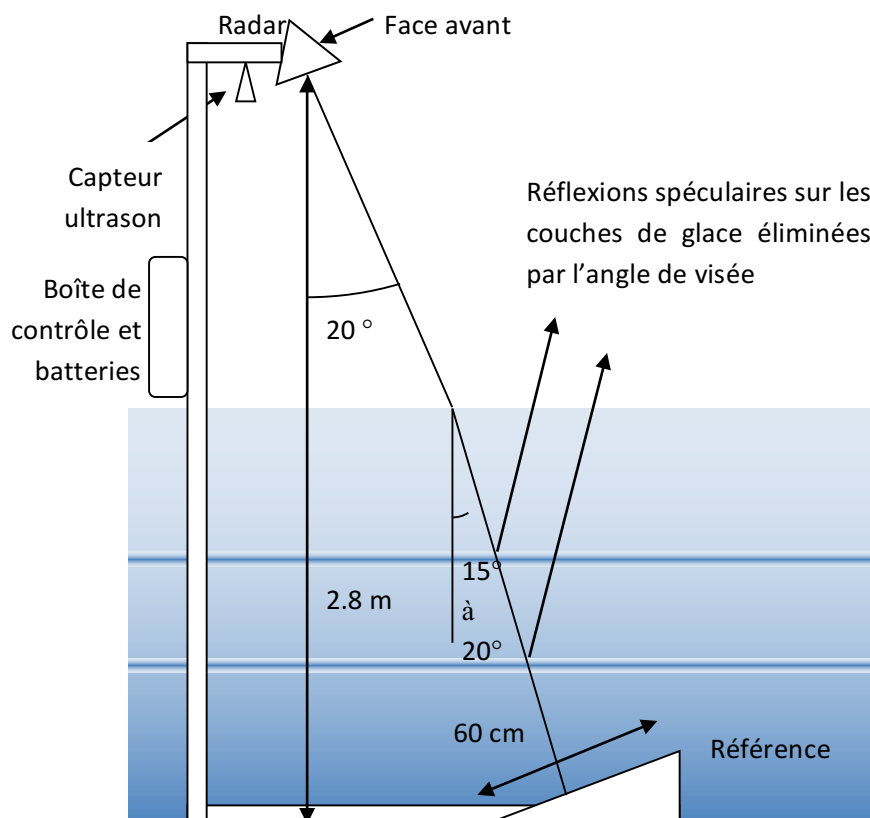


Figure 61 : Schéma du montage idéal pour station fixe mesurant le SWE

## 14. Conclusion mesure de SWE

En conclusion, il est possible de mesurer l'équivalent en eau de la neige avec un radar FMCW avec une précision théorique allant jusqu'à 3% d'erreur pour des couches de neige de 200 cm et plus. Cependant, les facteurs d'erreur sont multiples et la principale serait la présence de couches de glace à proximité de la référence, ce qui complexifie la prise de mesure de façon mobile avec le radar sur le terrain. Toutefois, à l'aide d'une installation fixe, les mesures seraient d'une meilleure qualité, car cela réduirait les principales sources d'erreur dont l'alignement radar-référence. Avec un angle de 20° et un plus grand réflecteur, l'impact des réflexions sur les couches de glace serait réduit et la détection du pic de référence serait améliorée, générant une précision du SWE significativement meilleur.

De plus, la sensibilité des ondes à l'eau liquide présente dans la neige empêcherait le système de calculer la densité pendant les périodes de dégel. Par contre, le système peut détecter cette condition par l'absence du pic de référence sur les profils et signaler la présence d'eau liquide. Cette limitation pourrait même être un atout pour déterminer les périodes de fonte et en faire le suivi pendant plusieurs années.

Si la plupart des sources d'erreurs sont corrigées par une station fixe, il est très probable que l'erreur sur les mesures soit inférieure à 15% pour les couches de neige à partir de 50 cm, ce qui surpasserait les caractéristiques du G-MON. D'autres tests sur le terrain sont toutefois à prévoir et, si possible, à proximité d'un capteur G-MON pour pouvoir comparer les résultats.

Nous recommandons donc de réaliser une station fixe selon le plan suggéré à la Figure 60 et de réaliser en continu des mesures de la température de l'air (neige sèche ou humide) et de la hauteur de neige. Des mesures manuelles de la densité et de la présence d'eau liquide réalisées régulièrement durant tout l'hiver permettront de valider le concept. Il serait en effet intéressant de tester, en plus du SWE, si le système permettrait de déterminer non seulement la présence, mais aussi la teneur en eau liquide en nous basant sur l'absorption du signal à partir de l'amplitude du pic de référence.



## 15. Bibliographie

- Brennan, P. V., & Al. (2013). Phase-sensitive FMCW radar system for high-precision Antarctic ice shelf profile monitoring. *IET Radar, Sonar and Navigation*, 1-11.
- Bureau du coroner. (2011). *RAPPORT DES ACTIVITÉS DES CORONERS EN 2010*. Bibliothèque et Archives Canada.
- Chaplin, M. (2000, august 21). *Water Phase Diagram*. Consulté le 2016, sur Water Structure and Science: [http://www1.lsbu.ac.uk/water/water\\_phase\\_diagram.html](http://www1.lsbu.ac.uk/water/water_phase_diagram.html)
- Derksen, C., & Al. (2005). Evaluation of passive microwave snow water equivalent retrievals across the boreal forest/tundra transition of western Canada. *Remote Sensing of Environment*, 315-327.
- Ferraro, R. R., & Al. (1996). An Eight-Year (1987–1994) Time Series of Rainfall, Clouds, Water Vapor, Snow Cover, and Sea Ice Derived from SSM/I Measurements. *American Meteorological Society*, 891-905.
- Griffiths, D. J. (2009). *Introduction to Electrodynamics*. PHI Learning.
- Griffiths, H. (1990). New ideas in FM radar. *Electron. Commun. Eng.*, pp. 185-194.
- Hallikainen, M., & Al. (2003). Dielectric properties of snow in the 3 to 37 GHz range. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 1329-1340.
- Hallikainen, M., & Jolma, P. (2002). Comparison of algorithms for retrieval of snow water equivalent from Nimbus-7 SMMR data in Finland. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 124-131.
- Heilig, A., Schneebeli, M., & Eisen, O. (2009). Upward-looking ground-penetrating radar for monitoring snowpack stratigraphy. *Cold Regions Science and Technology*, 152-162.
- Kanagaratnam, P., Markus, T., Lytle, V., & Heavey, B. (2007). Ultrawideband Radar Measurements of Thickness of Snow Over Sea Ice. *IEEE TRANSACTIONS ON GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING*, 45(9).
- Koh, G., Lever, J. H., & Arcone, S. A. (2010). *Autonomous FMCW Radar Survey of Antarctic Shear Zone*. Hanover: IEEE.
- La Société canadienne de la Croix-Rouge. (2006). *Noyades et autres traumatismes liés à l'eau au Canada, 1991-2000*. St. Joseph Communications.
- Lalumière, L. (2011). *GPR Capabilities for Ice Thickness Sampling of Low Salinity Ice and for Detecting Oil-InIce*. Canadian Contractor Report of Hydrography and Ocean Sciences 56.
- Langlois, A., & Al. (2004). Evaluation of the snow cover variation in the Canadian Regional Climate Model (CRCM) over Eastern Canada using passive microwave satellite data. *Hydrological Processes*, 1127-1138.
- MALÅ Geoscience. (n.d.). *Case Studies for GPR in Geophysical Surveys*. From MALÅ Geoscience: <http://www.malags.com/getattachment/465a6999-c36c-46bc-80bc-2183c3b7ebb0/Case-Studies-1>

- Marshall, H. P., Koh, G., & Al. (2012). SPATIAL VARIABILITY OF SNOW STRATIGRAPHY FROM MICROWAVE RADAR. *2012 International Snow Science Workshop*. Anchorage.
- MathWorks. (2014). *Fast Fourier Transform (FFT)*. From <http://www.mathworks.com/help/matlab/math/fast-fourier-transform-fft.html>
- Matzler, C., & Wegmuller, U. (1987). Dielectric Properties of freshwater ice at microwave frequencies. *J. Phys. D: Appl. Phys.*(20), 1623-1630.
- Pêche Québec. (n.d.). *Pêche Blanche : un guide pour la sécurité sur la glace*. From <http://www.pecheqc.ca/peche-blanche-un-guide-pour-la-securite-sur-la-glace/>
- Proksch, M., & Al. (2015). MEMLS3&a: Microwave Emission Model of Layered Snowpacks adapted to include backscattering. *Geoscientific Model Development*, 2611-2626.
- Rees, W. G. (2001). *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge University Press.
- Roy, A., & Al. (2016). Microwave snow emission modeling uncertainties in boreal and subarctic environments. *The Cryosphere*, 623-638.
- Sadiku, M. N. (1985 йил 15-Février). Refractive index of snow at microwave frequencies. *APPLIED OPTIC*, pp. 572-575.
- Stove, A. (n.d.). Linear FMCW radar techniques. *IEEE Proc.-F* 139, pp. 342-350.
- Tiuri, M. E., & Al. (1984 йил December). The Complex Dielectric Constant of Snow at Microwave Frequencies. *IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING*, pp. 377-382.
- Vuyovich, C. M., & Al. (2014). Comparison of passive microwave and modeled estimates of total watershed SWE in the continental United States. *Water Resources Research*, 9088-9102.
- Wang, W., Zhao, B., Liu, X., Yu, J., & Fang, G. (2012). High-resolution penetrating radar for ice thickness measurement. *14th International Conference on Ground Penetrating Radar (GPR)*. Shanghai.
- Wikipedia. (2014). *Radar à ondes entretenues*. (Wikipedia) From [http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar\\_%C3%A0\\_ondes\\_entretenues](http://fr.wikipedia.org/wiki/Radar_%C3%A0_ondes_entretenues)
- Wolff, C. (n.d.). *Radar à onde continue modulée en fréquence*. From Radartutorial.eu: <http://www.radartutorial.eu/02.basics/Radar%20%C3%A0%20onde%20continue%20modul%C3%A9e%20en%20fr%C3%A9quence.fr.html>
- Wolff, C. (n.d.). *Radar Basics - In-phase & Quadrature Procedure*. From radartutorial.eu: <http://www.radartutorial.eu/10.processing/sp06.en.html>

## 16. Annexes

### 16.1. Calcul de la longueur de pénétration théorique

Nous utilisons le calcul de la longueur de la pénétration provenant de l'ouvrage « Physical principles of remote sensing » (Rees, 2001) :

$$\delta_p = \frac{\lambda_0 \sqrt{e'}}{2\pi e''} \quad \text{Éq. 10}$$

Où  $e'$  est la partie réelle du diélectrique de la glace  $\sim 3.19$

$$e' = 3.1884 + 9.1 \cdot 10^{-4}(T - 273K); 243 < T < 273K \quad \text{Éq. 11}$$

$e''$  est la partie imaginaire du diélectrique de la glace

$$e'' = \frac{\alpha}{\nu} + \beta \nu \quad \text{Éq. 12}$$

Où (pour température  $T > 200K$ ) :

$$\beta = \beta_M + \Delta\beta \quad \text{Éq. 13}$$

$$\beta_M = \frac{B_1}{T} \frac{\exp(b/T)}{(\exp(b/T) - 1)^2} + B_2 \nu^2; \text{ pour } T < 200K \quad \text{Éq. 14}$$

$\nu$  en GHz,  $B_1 = 0.0207 \text{ KGHz}^{-1}$ ,  $b = 335K$  et  $B_2 = 1.16 \cdot 10^{-11} \text{ GHz}^{-3}$

$$\beta_M = \frac{0.0207 \text{ KGHz}^{-1}}{273 \text{ K}} \frac{\exp\left(\frac{335 \text{ K}}{273 \text{ K}}\right)}{\left(\exp\left(\frac{335 \text{ K}}{273 \text{ K}}\right) - 1\right)^2} + 1.16 \cdot 10^{-11} \text{ GHz}^{-3} \cdot 24^2 \text{ GHz}^2 \quad \text{Éq. 15}$$

$$\beta_M = 0.000044486 \text{ GHz}^{-1} + 0.0000000066816 \text{ GHz}^{-1} = \mathbf{0.0000444926 \text{ GHz}^{-1}}$$

$$\Delta\beta = \exp(-9.963 + 0.0372(T - 273.16)) \quad \text{Éq. 16}$$

$$\alpha = (0.00504 + 0.0062 \cdot \theta) \exp(-22.1\theta); \text{ en GHz} \quad \text{Éq. 17}$$

$$\theta = \frac{T_0}{T - 1}; \text{ où } T_0 = 300K \quad \text{Éq. 18}$$

Donc, avec  $T \sim 273K$ , on a un  $\Delta\beta = \mathbf{0.0000471}$

$$\beta = 0.0000444926 \text{ GHz}^{-1} + 0.0000471 \text{ GHz}^{-1} = 0.00009159 \text{ GHz}^{-1}$$

$$\alpha = (0.00504 + 0.0062 \cdot 1.103) \cdot 2.5946 \cdot 10^{-11} = 3.0819 \cdot 10^{-13} \text{ GHz}$$

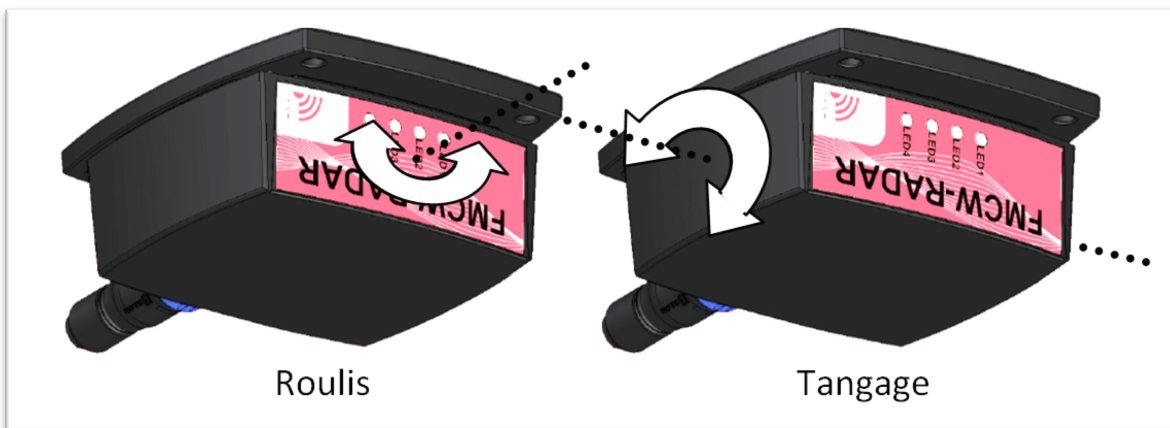
$$e'' = \frac{3.0819 \cdot 10^{-13} \text{ GHz}}{24 \text{ GHz}} + 0.00009159 \text{ GHz}^{-1} \cdot 24 \text{ GHz} = \mathbf{0.002198}$$

Avec une longueur d'onde de  $\lambda_0 = c/(24 \text{ GHz}) = 0.0125 \text{ m}$

$$\delta_p = \frac{0.0125 \text{ m} \sqrt{3.19}}{2\pi \cdot 0.002198} = \mathbf{1.62 \text{ m}}$$

## 16.2. Patron d'émission du radar

Deux axes ont été étudiés, le Roulis et le Tangage :



Le radar était situé au-dessus d'une plaque métallique à 71 cm. Les résultats donnent des profils très différents selon l'axe d'inclinaison, étant beaucoup plus sensible au tangage qu'au roulis :

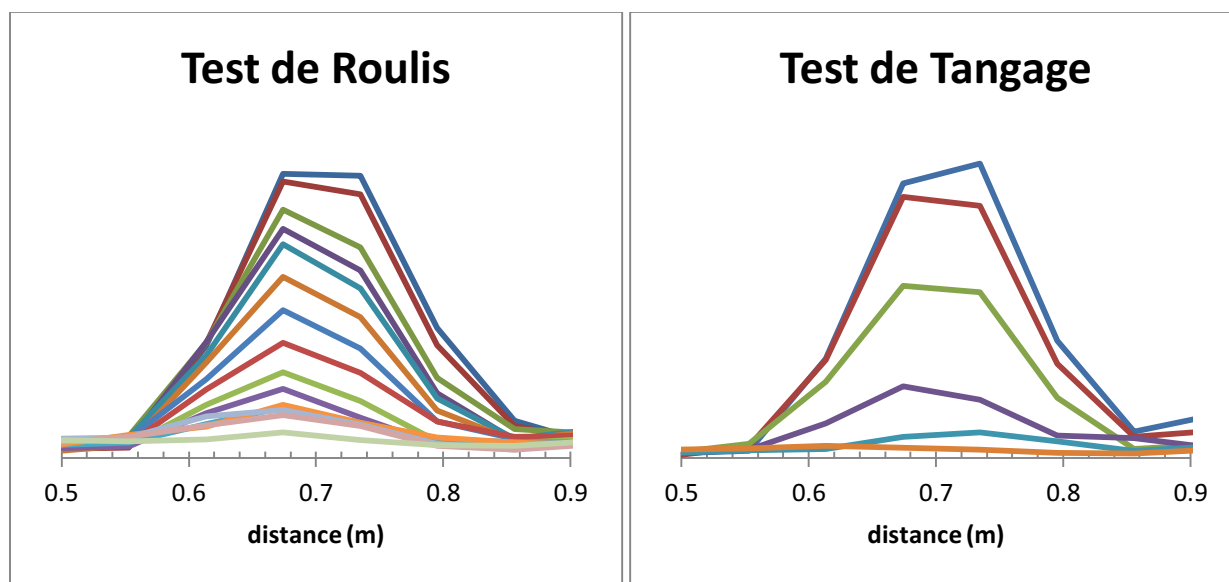


Figure 62 : Écho pour des angles de Roulis de 0 à 70 degrés et de Tangage de 0 à 25 degrés, à 5 degrés d'intervalle.

L'aire sous la courbe a été utilisée pour mesurer l'impact de façon quantitative. Le graphe angulaire suivant présente les résultats :

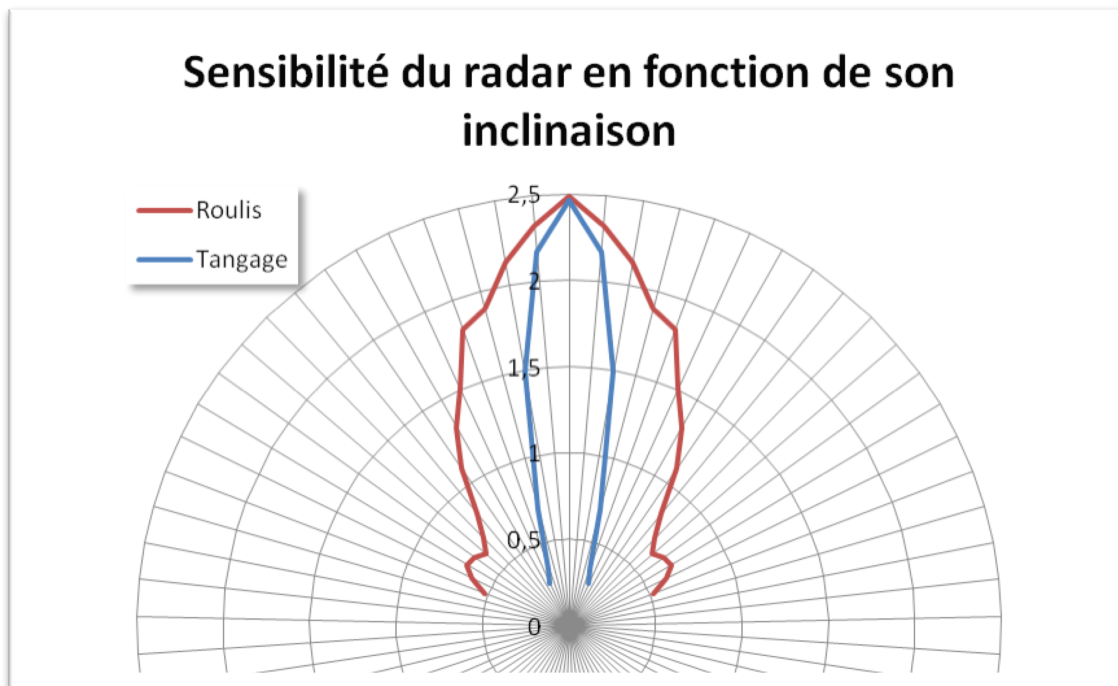


Figure 63 : Patron de rayonnement pour les deux axes. Chaque rayon correspond à 5 degrés.

On voit bien que le tangage est très directionnel tandis que le faisceau correspondant au roulis est plus large. Ceci s'explique par le réseau d'antennes développé par IMST, dont on voit une ancienne version sur la prochaine figure :

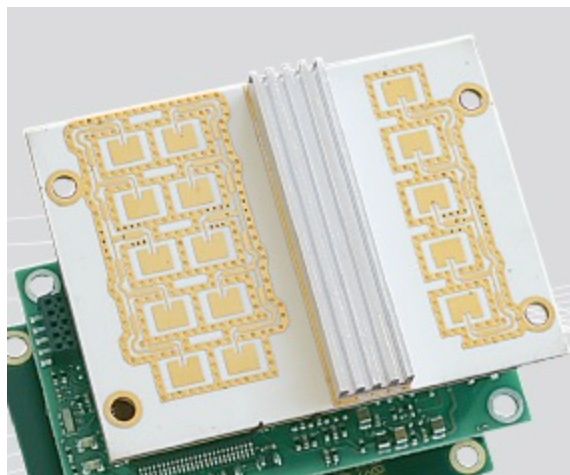
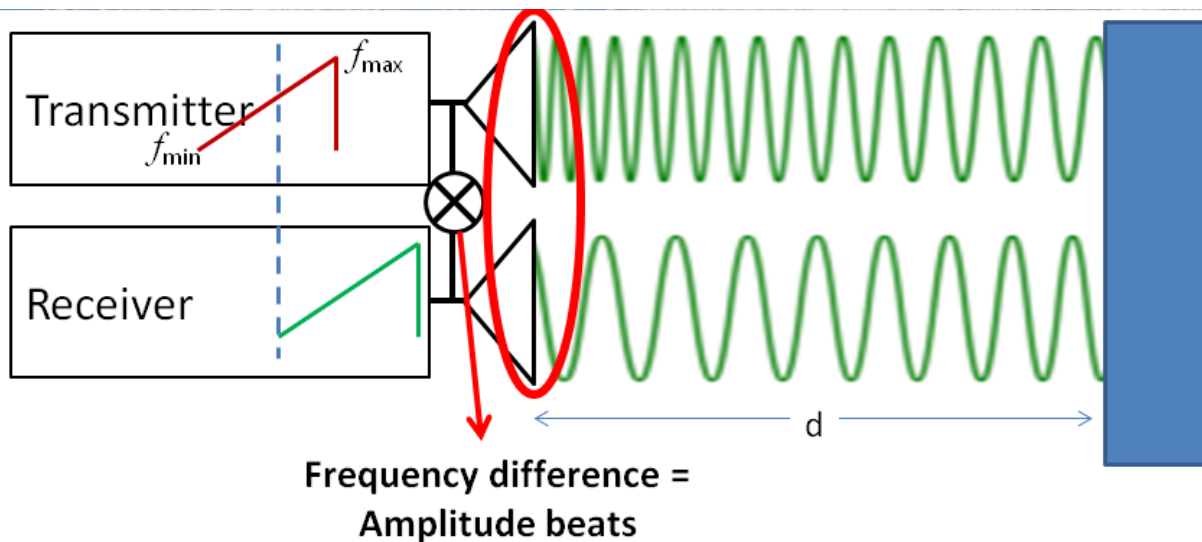


Figure 64 : Réseau d'Antenne, à gauche les antennes réceptrice, à droite l'antenne émettrice.

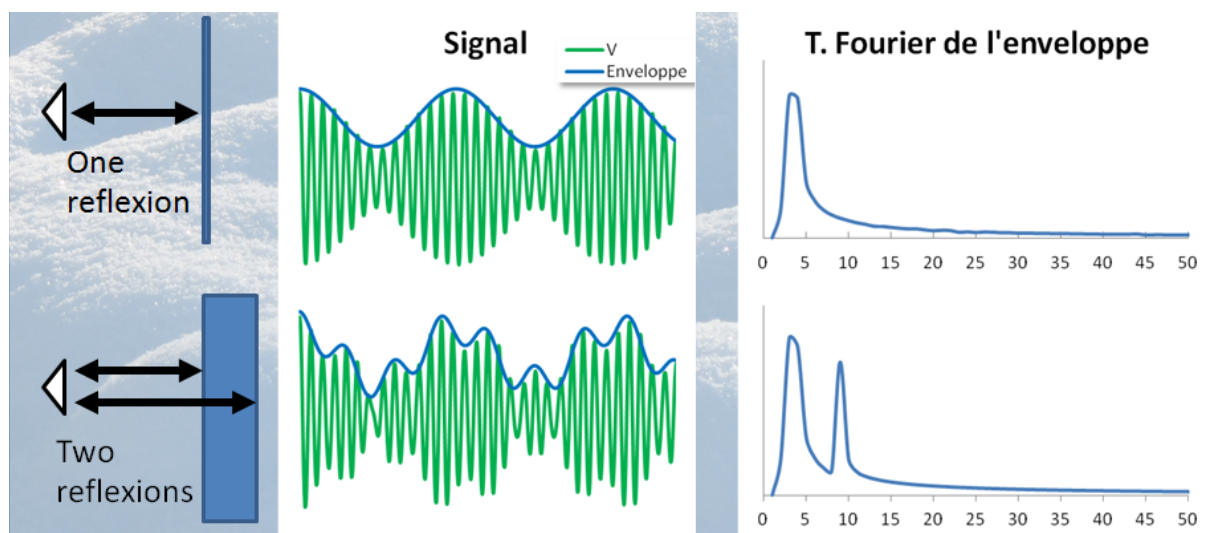
Comme ce radar a été conçu pour surveillance routière, le réseau d'antennes fait en sorte qu'il y a une interférence constructive entre les pastilles émettrices, ce qui fait que l'angle d'émission est plus étroit dans le sens avant arrière que dans les côtés, permettant d'avoir une « vision » plus horizontale.

### 16.3. Détails du calcul de la limite de résolution d'un radar FMCW

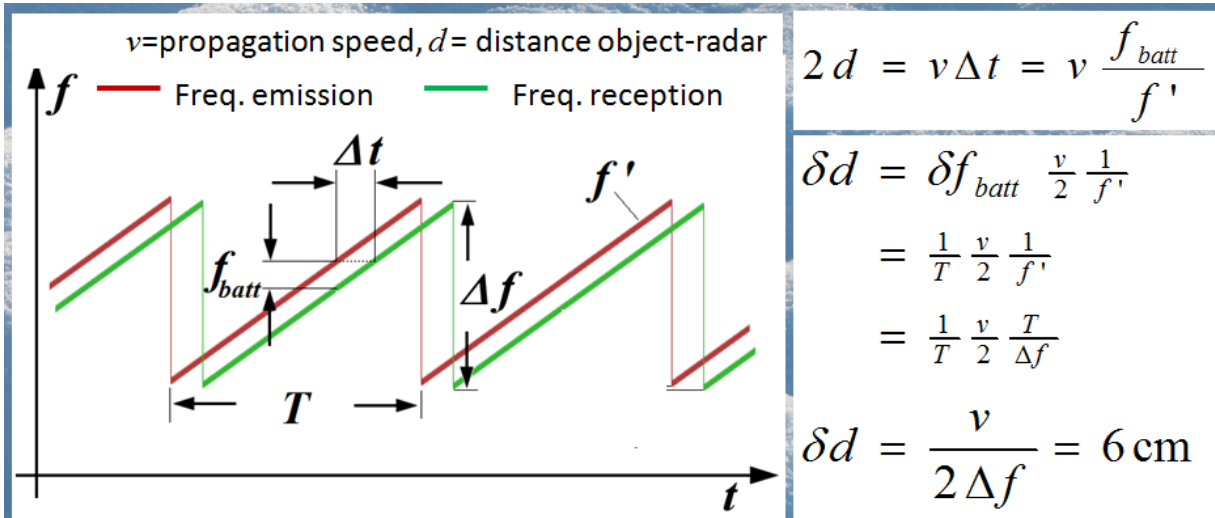
Les radars FMCW fonctionnent en mode continu en émettant une onde radio dont sa fréquence change constamment. Elle débute à une fréquence minimale ( $f_{min}$ ) et balaye toutes les fréquences selon une rampe linéaire jusqu'à la fréquence maximale ( $f_{max}$ ). Lorsque l'onde frappe un obstacle et revient au radar, on mélange cette onde avec celle de l'émetteur. Le temps que cette onde a pris pour parcourir deux fois la distance  $d$ , l'onde émise par l'émetteur a eu le temps de changer de fréquence proportionnellement à son taux de variation  $f'$ . Comme les deux ondes mélangées n'ont pas la même fréquence, le résultat présente un battement de l'amplitude de l'enveloppe. Ce battement est proportionnel à la différence de fréquence et, du même coup, à la distance  $d$ .



Pour connaître la ou les fréquences contenues dans le battement, on effectue une transformée de Fourier sur la période complète de la rampe ( $T$ ). La distance  $d$  peut être obtenue par la relation  $d = v f_{batt} / 2f'$  où  $v$  est la vitesse de propagation dans le milieu



Comme la résolution en fréquence d'une transformée de Fourier ( $\delta f_{batt}$ ) est inversement proportionnelle à la période et que le taux de variation de la fréquence ( $f'$ ) est fonction de la période et de la largeur de bande ( $\Delta f$ ), nous pouvons exprimer le pouvoir de résolution d'un radar FMCW uniquement à partir de sa largeur de bande et de la vitesse de propagation de l'onde dans le milieu. Pour notre radar, qui a une largeur de bande de 2.5 GHz, nous avons une résolution de 6 cm dans l'air.







La page suivante dans le document parle de l'installation de la pile qui maintient l'heure pendant la veille :

Extrait p 4-6

« VDDBU pin is powered from the 3.3V rail and a backup battery BT1 via a dual Schottky diode D1. »

### Backup Battery

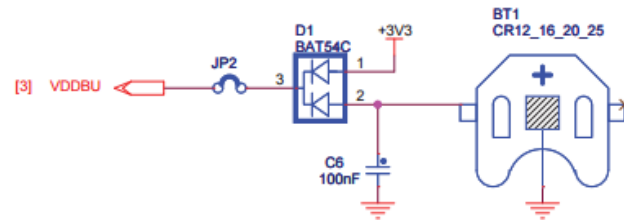


Figure 66 : Circuit de la pile de maintien sur la carte SAM3X-EK

Avec cette information, nous avons pu faire les modifications suivantes pour pouvoir utiliser cette carte dans des stations fixes :

- Alimenter la broche VDDBU du processeur avec une pile CR2032 pour le maintien de l'heure durant la veille.
- Utiliser le signal de sortie SHDN du processeur pour couper le reste de l'alimentation de la carte.
- Ajouter un bouton sur la broche FWUP pour forcer le CPU à sortir de veille.
- Contrôler l'alimentation du Radar par la carte.
- Minimiser la consommation électrique des autres composantes de la carte.
- Écrire les fonctions nécessaires à la mise en veille.

#### 16.4.2. Alimenter la broche VDDBU avec une pile CR2032

Présentement cette broche est mise au 3.3V sur la carte Arduino Due.

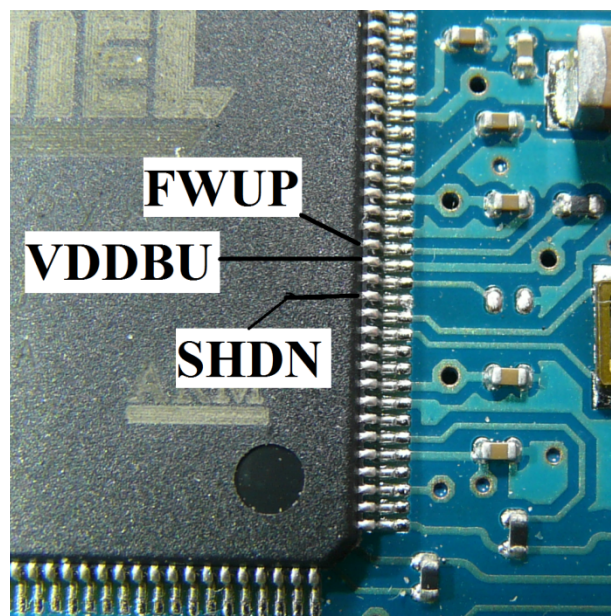


Figure 67 : Emplacement des broches pour la mise en veille sur le processeur ATMEL

Pour faire le même circuit que décrit à la Figure 66, il nous faut modifier le circuit original de l'arduino comme ceci :

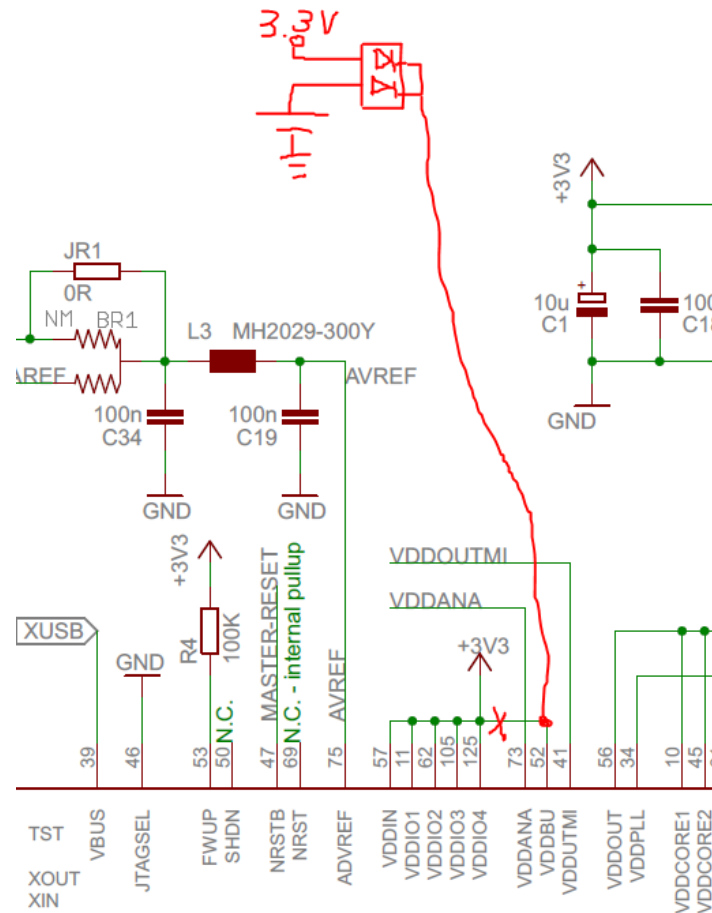


Figure 68 : Modification de la carte Arduino pour la broche VDDBU (shéma)

De plus nous avons pu utiliser la broche #1 du connecteur IOREF qui n'est pas utilisé pour relier la pile, qui est monté sur une autre carte, à la carte Arduino.

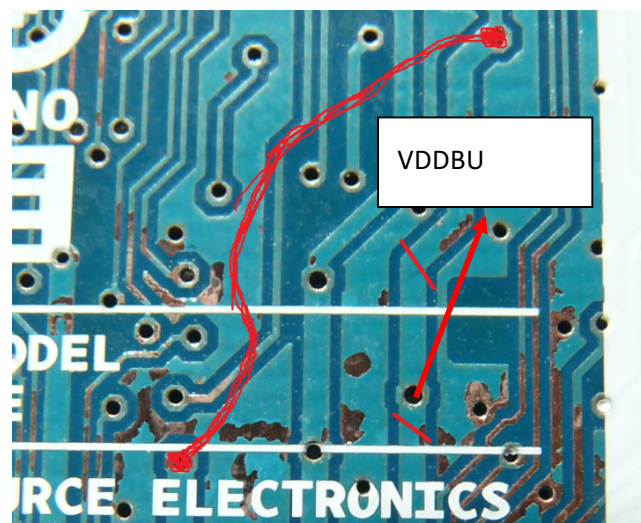


Figure 69 : Modification de la carte Arduino pour la broche VDDBU (photo)

Patrick Pomerleau

09236230

### 16.4.3. Utiliser le signal de sortie SHDN du processeur

Sur la carte Arduino, le régulateur 5V à 3.3V possède déjà la fonction « Enable » (En) qui permet de désactiver son fonctionnement durant la veille, mais elle est reliée à l'alimentation 12V de la carte par la résistance R10. Il faut donc remplacer cette résistance par le circuit double MOSFET décrit à la Figure 65 à l'exception d'utiliser un MOSFET IRLML2244 au lieu du IRLML6401, qui résiste à une tension de 20V au lieu de 12V. Ce circuit est relié à la broche SHDN du processeur, qui n'était simplement pas connecté sur la carte au paravent.

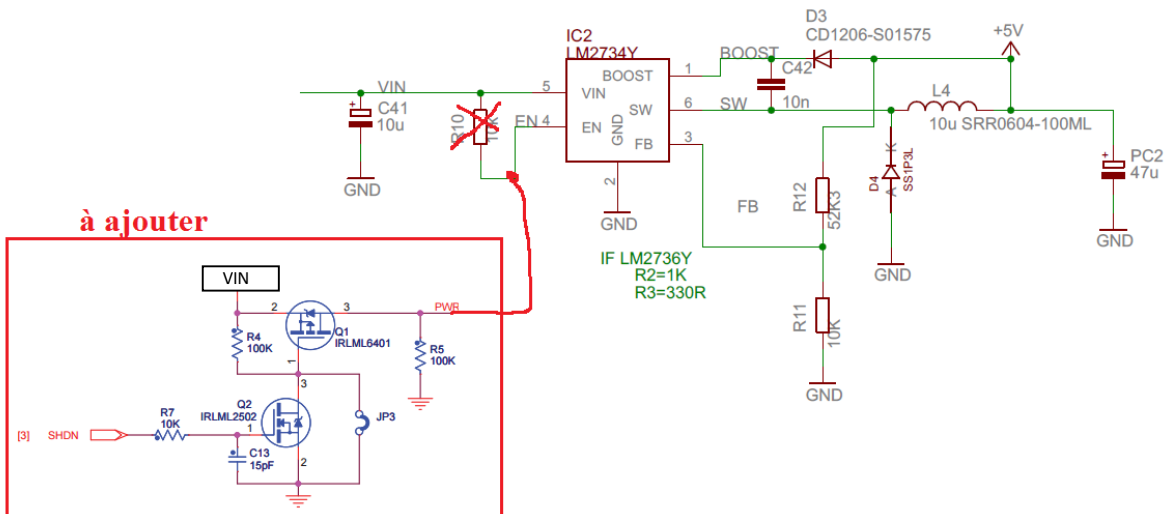


Figure 70 : Modification de la carte Arduino pour la broche SHDN (schéma)

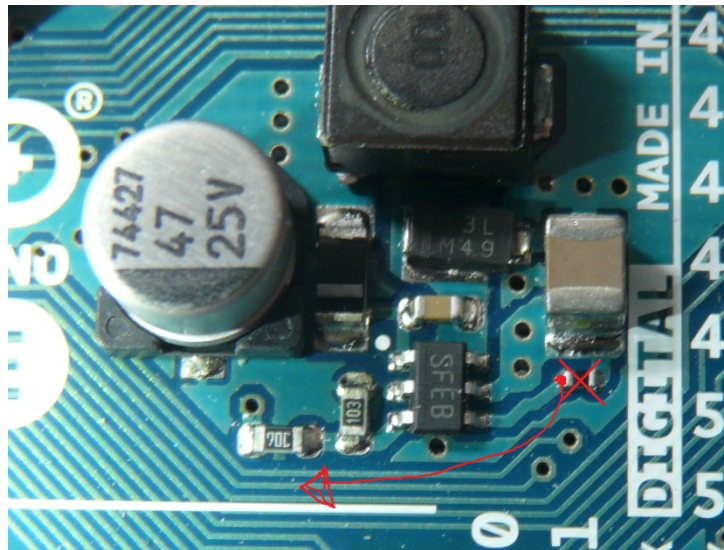


Figure 71 : Modification de la carte Arduino pour la broche SHDN (photo)

### 16.4.4. Ajouté un bouton sur la broche FWUP pour forcer le CPU à sortir de veille

Il nous fallait un moyen de forcer une lecture avant que temps de veille soit écoulé, ce qui peut être très long. Nous avons donc ajouté un bouton sur la carte Sheild, connecté à la broche SCL1 et redirigé ensuite

#### 16.4.5. Contrôler l'alimentation du Radar par la carte

Des tests ont été effectués avec des temps de « préchauffe » du Radar (délais entre la mise sous tension et la première lecture) de 0.5 à 5 secondes et aucune différence n'est notable dans les mesures, même au froid. Alors nous avons opté pour un délai de 0.5 seconde pour économiser davantage la batterie.

Après transformation, la carte consomme  $\sim 100\mu A$  sur 12V en veille. C'est bien, mais on peut encore faire mieux ! Cette consommation résiduelle passe principalement à travers de la résistance RN4C.



Une fois fait, le courant de veille sur 12V tombe sous  $0.4\mu A$ , limite de mesure de notre appareil.

Nous avons changé le circuit pour que la broche FWUP soit au VDDBU au lieu d'être au 3.3V, nécessaire si on veut utiliser cette broche pour forcer le processeur à sortir de veille par un périphérique extérieur ou simplement par un bouton pour provoquer une nouvelle lecture.

Maintenant, il reste la consommation sur la pile CR2032 qui est de 220µA, ce qui est trop élevé (durée de vie de 40 jours à ce rythme). Normalement il devrait consommer 4µA avec le RTC en marche. C'est le IC6 (ATMEGA16U2-MU) qui draine ce courant à travers sa broche #22, connectée au Master-Reset par la résistance R23 de 1k (voir figure ci-dessous). Cette connexion permet de forcer un Reset du processeur par le port série de programmation, fonctionnalité absente dans le circuit démo SAM3X-EK de ATMEL puisqu'ils utilisent le port USB « natif » du processeur pour la programmation. Une fois la résistance enlevée, la consommation de la pile CR2032 tombe à 3.3µA comme attendu. Sauf qu'il est difficile de programmer la carte parce que le programme ne peut pas forcer de Reset du processeur et démarrer le logiciel interne pour les mises-à-jour.

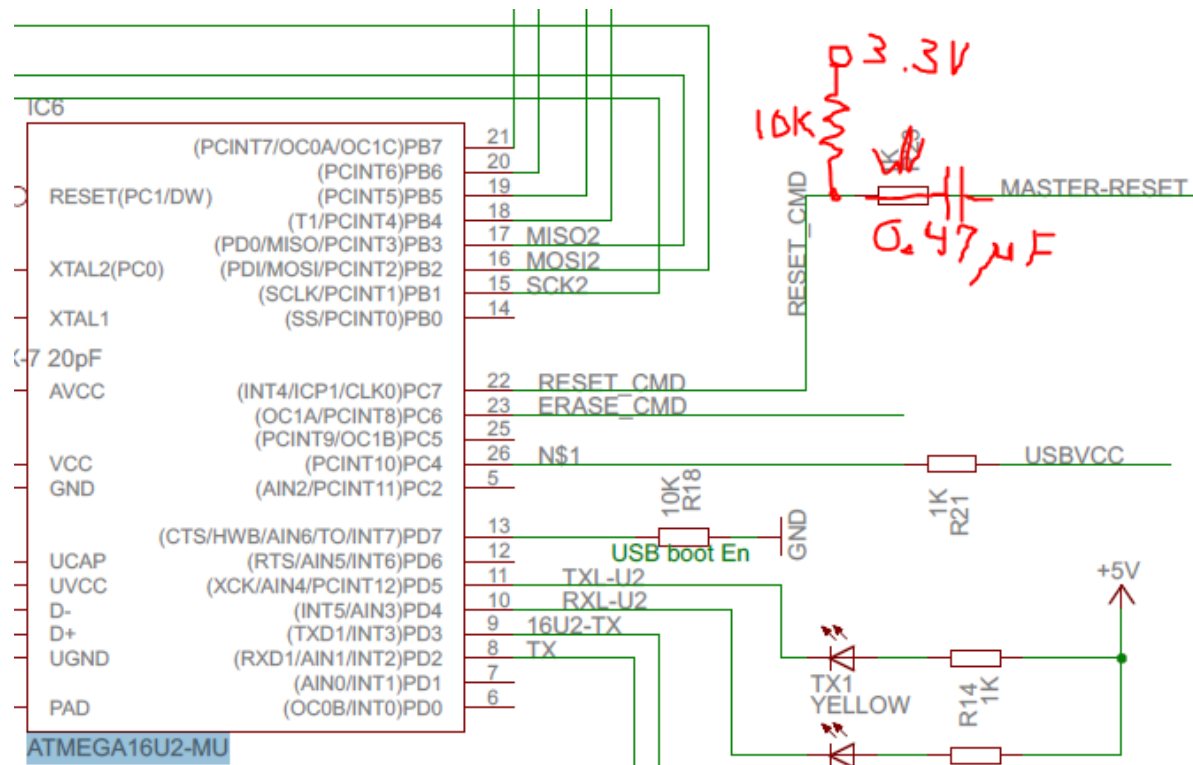


Figure 73 : Modification de la carte Arduino pour le courant de fuite sur la pile de maintien

Le problème a été résolu en ajoutant un condensateur de 0.47µF en série entre l'IC6 et le processeur. Ce condensateur empêche le courant de la pile de se vider à travers IC6, mais permet à l'impulsion de la commande de Reset de passer. Comme la broche #22 est à collecteur ouvert, une résistance de pull-up au 3.3V est nécessaire pour charger le condensateur. Avec ce circuit, tout fonctionne comme avant pour la programmation.

### 16.4.7. Fonctions nécessaires à la mise en veille

Comme la carte n'a pas été conçue pour la mise en veille, il n'y a pas de fonction de mise en veille disponible sur le site d'Arduino. Nous avons donc écrit les étapes et fonctions nécessaires pour mettre le processeur en veille jusqu'à une heure prédéfinie de l'alarme de l'Horloge à Temps Réel (RTC). Une fois l'heure arrivée, le processeur se réveille et exécute le programme à partir du début comme lors sa mise en route normale. Voici le code :

```
//***** Variable globale pour Sleep *****
1.  RTC_clock rtc_clock(XTAL); // Select the Slowclock source
2.  #define mSCR                *((volatile unsigned long *) 0xE000ED10)
3.  #define SUPC_SMMR           *((volatile unsigned long *) 0x400E1A14)
4.  #define SUPC_WUMR           *((volatile unsigned long *) 0x400E1A1C)

5.  void RTCSetup(void)
6.  /
7.  rtc_clock.init();
8.  rtc_clock.attachalarm(RTCAlarmInt);
9.  /

10. void Sleep(void)
11. /
12.  SUPC_WUMR |= 0x0008 + 0x0401;
13.  mSCR = mSCR | 0x04; //Set SLEEPDEEP
14.  SUPC_SMMR = 0;
15.  delay(2);
16.  asm("WFE"); //Send Sleep command
17.  /
```

### 16.4.8. Récapitulatif de la consommation de la carte Arduino

Le tableau suivant montre les consommations de la carte Arduino une fois toutes les modifications terminées. La consommation ne tient pas compte de la consommation du Radar ni de l'auto décharge des piles.

Puissance consommée	En marche	En veille
pile 12V 7Ah	600 mW	< 5 $\mu$ W
pile CR2032	0 $\mu$ W	9.6 $\mu$ W
Durée de vie	En marche	En veille
pile 12V 7Ah	5.8 jours	> 1900 ans
pile CR2032	Inf.	8 ans

Tableau 10 : récapitulatif de la consommation électrique et de la durée de vie des piles après transformation

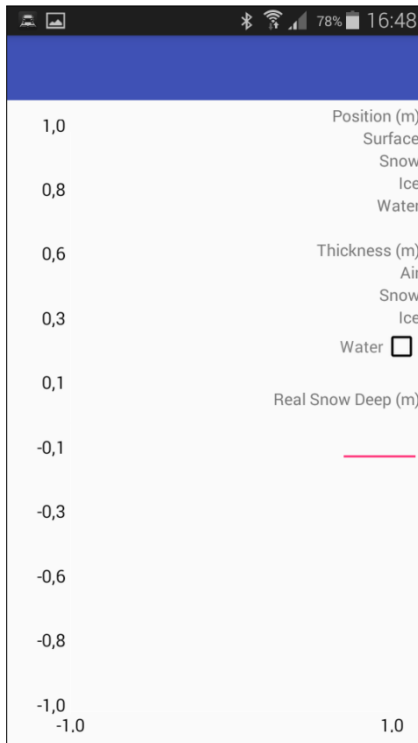


#### 16.4.9. Liste des pièces nécessaires

<b>2x</b>	IRLML2244	2\$
<b>2x</b>	IRLML2502	2\$
<b>3x</b>	Résistance 10 k $\Omega$	0.3\$
<b>2x</b>	Résistance 100 k $\Omega$	0.2\$
<b>2x</b>	Condensateur 15 pF	0.2\$
<b>1x</b>	Condensateur 0.47 $\mu$ F	0.1\$
<b>1x</b>	Diode BAT54C	0.5\$
<b>1x</b>	pile CR2032 + support	3\$
Total		8.3\$

## 16.5. Application Android, détails de l'interface usager

Cette interface permet de contrôler le radar et de voir ses profils en temps réel sur un téléphone Android.



### Position

Surface : Distance entre le radar et la première surface détectée.

Snow : Distance entre le radar et la surface de la neige.

Ice : Distance entre le radar et la surface de la glace.

Water : Distance entre le radar et la surface de l'eau, sans compensation pour l'indice de la glace (distance optique).

### Épaisseur (Thickness)

Air : Épaisseur de la masse d'air sous le radar.

Snow : Épaisseur de la neige (surface de neige – surface de la glace)/indice de la neige.

Ice : Épaisseur de la glace (surface de la glace – surface d'eau)/indice de la glace.

Real Snow Deep : Note de l'épaisseur réelle de la neige, non fonctionnelle.

### Menu

Start Scan : débute les lectures radar (1 lecture/seconde).

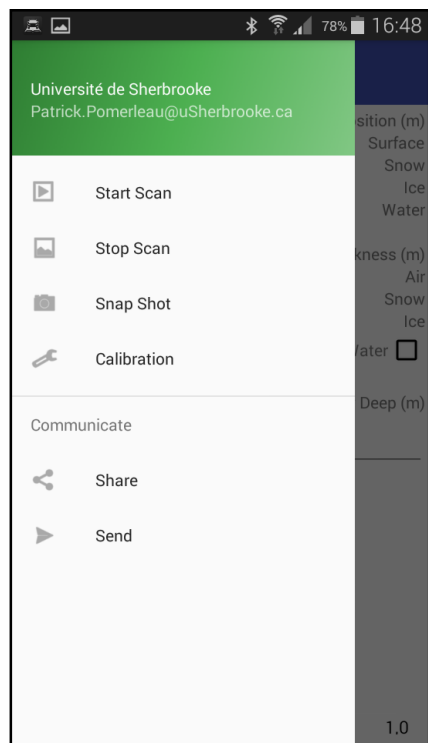
Stop Scan : arrête les lectures radar.

Snap Shot : effectue un enregistrement de la dernière lecture. Les données brutes sont enregistrées dans la carte SD de la carte Arduino.

Calibration : sert à mémoriser un profil effectué dans les airs, pour ensuite le soustraire le bruit aux prochaines mesures. Cette calibration affecte le profil affiché à l'écran, mais pas les données brutes enregistrées sur la carte. Le profil d'air est mémorisé dans le fichier CALIB.CSV sous le même format que les données brutes.

Share : Ne sert pas.

Send : Ne sert pas non plus.





## 16.6. Exemple de fichier config.ini

Ce fichier texte doit se trouver dans le répertoire racine de la carte SD. Le caractère « ; » marque le début d'une ligne de commentaires. Le paramètre WarmUp détermine le délai entre la mise en route du radar et la demande de la première mesure.

*: Fichier de configuration pour l'oeRadar Datalogger*

*[RadarParam]*

*WarmUp = 500 : Radar Warm up time before a scan (ms)*

*band = 13 ; set Bandwidth: 0-13 <- BB in [MHz]: 50, 75, 125, 230, 250, 500, 800, 1000, 1200, 1500, 1800, 2000, 2200, 2500*

*ramp\_time = 1 ; ramp\_time in [ms] 1-19*

*dmax = 4 ; max-Distance to define amount of FFT-Data in [m] (FMCW-Mode) (only Transmitted)*

*pad = 8 ; pad-factor*

*fftDatTyp = 0 ; 0: magnitudes, 1: mag+phase, 2: real+imag, 3: mag+object\_angle*

*Ch1\_active = 1 ; activate the channels 1 ; 0: inactive, 1: active*

*Ch2\_active = 1 ; activate the channels 2 ; 0: inactive, 1: active*

*Ch3\_active = 1 ; activate the channels 3 ; 0: inactive, 1: active*

*Ch4\_active = 1 ; activate the channels 4 ; 0: inactive, 1: active*

*[Schedule]*

*Mode = 0 ; 0: Interval used, 1: FixeTime used*

*FixeTime = 00:01, 00:02, 00:05, 00:10 ;*

*GpsSync = 0 ; 0= Not sync time on Gps, 1 = Sync time on Gps*

## 16.7. Exemple de fichier de données brutes

Les fichiers de données brutes sont en format CSV où le « ; » est le séparateur de colonne. Le nom du fichier est du format **yyymmjj.csv** et contient toutes les mesures effectuées la même journée en ordre croissant. Le début du fichier commence toujours par un en-tête commun qui décrit les paramètres du radar. Pour les détails des paramètres, se référer au fichier config.ini. La position en X des mesures est exprimée en mètre et n'est pas compensée par le biais de 11.18 cm déterminé à la section 5.1.2.

En tête commune

```

↑ WarmUp time (ms) : 500;.....
  Largeur de bande : 13;.....
  Distance max (m) : 8;.....
  Padding : 8;.....
  FFT data type (0=mag, 1=mag+ph, 2=re+im, 3=mag+obj angl) : 0;.....
  Canaux actif : 15;.....
  .....
↓ Lecture par canal : 513;.....
  24-03-16 11:34;.....
  X(m):Ch1;Ch2;Ch3;Ch4;:
  0:1004936;786523;995599;952985;935011;
  0.0078;1019857;818756;1013771;960721;953276;
  0.0156;1061337;908213;1063655;983400;1004151;
  0.0234;1121251;1039072;1133814;1019452;1078397;
  0.0312;1190264;1195947;1210867;1066517;1165899;
  0.039;1260770;1367227;1283090;1121573;1258165;
  0.0468;1328332;1544566;1341891;1181176;1348991;
  0.0546;1391761;1721618;1381962;1241620;1434240;
  0.0624;1452332;1893114;1400976;1299082;1511376;
  0.0702;1512515;2054308;1399068;1349752;1578911;
  0.078;1574520;2200767;1378267;1390030;1635896;
  0.0858;1638989;2328303;1341917;1416661;1681468;
  [...]
  3.9844;363910;1151101;278447;224491;504487;
  3.9922;308548;1158336;277965;230116;493741;

```

## 16.8. Protocole de mesure Lac Memphrémagog

1. Point fixe avec neige :
  - 1.1. Se positionner sur un point fixe avec le radar.
  - 1.2. Ajuster le niveau du radar.
  - 1.3. Prendre une lecture à la seconde tout en déplaçant le traîneau de quelques centimètres vers l'avant et l'arrière pendant de 5 à 10 secondes.
  - 1.4. Se déplacer de 10 m à un autre point fixe et répéter l'étape 1.1 pour 12 points fixes
2. Transect avec neige :
  - 2.1. Se déplacer à sens inverse (du point 12 vers le point 1) à vitesse constante en prenant une lecture par seconde.
3. Transect sans neige :
  - 3.1. Retirer la neige avec des pelles jusqu'à la glace (manque de temps alors on a fait que 90 m au lieu de 110 m)
  - 3.2. Se déplacer à vitesse constante du point 10 vers le point 1 en prenant une lecture par seconde.
4. Point fixe sans neige :
  - 4.1. Se positionner sur un point fixe avec le radar.
  - 4.2. Prendre une lecture à la seconde tout en déplaçant le traîneau de quelques centimètres vers l'avant et l'arrière pendant de 5 à 10 secondes
  - 4.3. Se déplacer de 10 m à un autre point fixe et répéter l'étape 4.1 pour 10 points fixes
5. Mesures manuelles :
  - 5.1. Épaisseur de la glace
    - 5.1.1. Percer la glace avec une tarière.
    - 5.1.2. Dégager la glace pour exposer les bords.
    - 5.1.3. Plonger un bâton avec crochet sous la glace et noter la surface de la glace sur le bâton
    - 5.1.4. Mesurer avec un galon la position de la marque.
  - 5.2. Épaisseur de neige
    - 5.2.1. Insérer un bâton dans la neige à proximité d'où la mesure a été effectuée.
    - 5.2.2. Noter la surface de la neige sur le bâton.
    - 5.2.3. Retirer le bâton et mesurer la marque avec un galon.